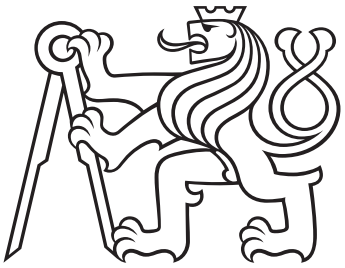
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta Elektrotechnická

Katedra měření
Studijní program: Kybernetika a robotika



Konstrukce ultrazvukové páječky

Construction of an Ultrasonic Soldering Device

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracovala: Alisa Pavlova
Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.
Rok: 2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pavlova** Jméno: **Alisa** Osobní číslo: **453105**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Konstrukce ultrazvukové páječky

Název bakalářské práce anglicky:

Construction of an Ultrasonic Soldering Device

Pokyny pro vypracování:

1. Podle pokynů vedoucího práce navrhněte a realizujte funkční vzorek ultrazvukové páječky.
2. Uvažujte výkon tepelného tělesa do 100W a kmitočet sonotrody do 60kHz.
3. Pro řízení použijte vhodný mikroprocesor.

Seznam doporučené literatury:

[1] Dale Ensminger, Leonard J. Bond, Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications, Third Edition, CRC Press, 2011.
[2] K. Nakamura, Ultrasonic Transducers, Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications, 1st Edition, Woodhead Publishing, 2012.
[3] Juan A. Gallego-Juárez, Karl F. Graff, Power Ultrasonics, Woodhead Publishing, 2014.
[4] www.parallax.com

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc., katedra telekomunikační techniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **14.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce:
do konce letního semestru 2020/2021

prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce		podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

. | Datum převzetí zadání

Podpis studentky

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne ....

Alisa Pavlova

Poděkování

Rada bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Pavlu Zahradníkovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a pomoc při zpracování této práce. V neposlední řadě chci také poděkovat své rodině a všem přátelům, kteří mě celou tu dobu podporovali.

Alisa Pavlova

Název práce:
Konstrukce ultrazvukové páječky

Autor: Alisa Pavlova

Studijní program: Kybernetika a robotika
Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.
Katedra měření, Fakulta Elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt: Bakalářská práce se zabývá návrhem vzorku ultrazvukové páječky a jeho následnou realizací. Pro dosažení těchto cílů byly prozkoumány potřebné součástky. Pak na základě požadavků na vybavení pro ultrazvukové pájení byly zvoleny ty nejvhodnější. Potom bylo navrženo, sestaveno a otestováno zapojení těchto součástek a ověřena funkčnost výsledného pájecího systému. Po realizaci a testování páječky byly spočítány náklady potřebné na její výrobu a porovnány s cenou komerčních ultrazvukových pájecích systémů. V závěru byly shrnuty výsledky projektu a navrhnuty vylepšení pro možná budoucí zdokonalení vyrobené ultrazvukové páječky.

Klíčová slova: Pájení, pájecí systém, ultrazvuk, ultrazvuková páječka

Title:
Construction of an Ultrasonic Soldering Device

Author: Alisa Pavlova

Abstract: The bachelor's thesis deals with design of an ultrasonic soldering device construction and with its realization. For achieving these goals there were studied necessary components. Some of these components, which met the requirements for ultrasonic soldering equipment, were chosen for this project. Then the connection of them was designed, constructed and tested. Functionality of the final soldering system was verified. After that expense of the device was calculated and compared with prices of commercial ultrasound soldering systems. In a conclusion of the thesis the results were summarized and there were proposed some improvements for the future projects.

Key words: Soldering, soldering system, ultrasound, ultrasonic soldering device

Obsah

Úvod **10**

1 Úvod do technologie ultrazvukového pájení **11**
1.1 Pájení . . . 11
1.2 Ultrazvuk . . . 12
1.3 Ultrazvukové pájení . . . 12
1.3.1 Výhody . . . 13
1.3.2 Využití v průmyslu . . . 13

2 Teoretická část **15**
2.1 Konstrukce ultrazvukové páječky . . . 15
2.1.1 Požadavky na vybavení pro pájení ultrazvukem . . . 16
2.2 Ultrazvukový převodník . . . 16
2.2.1 Magnetostrikční převodník . . . 16
2.2.2 Kapacitní převodník . . . 16
2.2.3 Piezoelektrický převodník . . . 16
2.3 Výkonový zesilovač . . . 18
2.3.1 Zesilovače závislé na úhlu otevření tranzistorů . . . 19
2.3.2 Spínací zesilovače . . . 21
2.3.3 Použitý výkonový zesilovač . . . 22

3 Praktická část **23**
3.1 Vývojová deska . . . 23
3.2 Zesilovací prvek . . . 24
3.2.1 Řídicí signály . . . 26
3.3 Mechanická část . . . 27
3.3.1 Ultrazvukový převodník . . . 27
3.3.2 Topné tělísko . . . 28
3.4 Zdroje napájení . . . 29
3.4.1 SPS-9600 . . . 29
3.4.2 BML 351011/2 . . . 30
3.5 Uživatelské rozhraní . . . 31
3.5.1 Sériový terminal . . . 31
3.5.2 Trackball modul . . . 32

4 Experementální časť **35**
4.1 Testování generování eletrických pulzů . . . 35

4.2 Testování zesilovacího prvku 36
4.3 Testování piezo-měniče 37
4.4 Testování celého pájecího systému 39
4.4.1 Pájecí slitina 39
4.4.2 Výsledky 40

5 Náklady **41**

Závěr **43**

Literatura **45**

Seznam obrázků **50**

Seznam tabulek **51**

Seznam příloh **53**

Úvod

Bakalářská práce se zabývá návrhem konstrukce ultrazvukové páječky a její realizací. Cílem je vývoj funkčního vzorku s pomocí ultrazvuku pájecího systému a porovnání nákladů na jeho výrobu s cenou komerčních výrobků. Cena komerčních ultrazvukových pájecích stanic převyšuje 100 000 Kč. Jako příklad uveďme ultrazvukové pájecí stanice firmy Kuroda Techno Co., Ltd. (viz obr. 1-a) a a firmy MBR Electronics GmbH (viz obr. 1-b).

(a) (b)

Obrázek 1: Pájecí stanice od společností Kuroda Techno Co., Ltd. (a) a MBR Electronics GmbH (b) [20, 21]

Práce se skládá z několika částí:

- Úvod do technologie ultrazvukového pájení;
- Teoretická část;
- Praktická část;
- Experimentální část;
- Náklady;
- Závěr.

V první kapitole se vysvětluje technologie ultrazvukového pájení, jeho výhody, využití v průmyslu a odlišnosti od klasického pájení.

V teoretické části se probírají součástky, ze kterých se ultrazvuková páječka skládá.

V této kapitole jsou popsány různé druhy těch součástek a na základě jejích funkcí jsou zvoleny ty nejvhodnější.

Praktická část se zabývá návrhem konkretního zapojení, což zahrnuje v sobě volbu a popis používaného hardwaru a jeho propojení. Kromě hardwarové části obsahuje tato kapitola i popis navrženého softwaru a jejích s hardwarem vzájemnou souvislost.

V experimentální části jsou popsány experimenty a testy, které se postupně prováděly během výroby vzorku ultrazvukové páječky. Také je ukázána funkčnost konečné varianty vyrobeného pájecího systému.

Předposlední kapitola obsahuje počítání nákladů na výrobu ultrazvukového pájecího systému a jích porovnání s cenou komerčních systému.

V závěru jsou popsány výsledky projektu a možná vylepšení.

Kapitola 1

Úvod do technologie ultrazvukového pájení

1.1 Pájení

Klasické pájení je procesem spojování kovových součástek, který probíhá tak, že jejich povrchy se dávají dohromady spolu s pájecí slitinou (pájkou) a tavidlem a pak se zahřívají na určitou teplotu. Tato teplota musí být vyšší než je teplota tavení pájky a nižší než teplota tavení součástek. Když se pájka roztaví a přejde do kapalného stavu, povrchy pájených součástek se začnou smáčet. Potom se zahřívání zastaví a pájecí slitina se vrátí do pevného stavu.

Výsledkem je spoj, jehož pevnost obvykle závisí na čistotě povrchů součástek. Pro lepší "smáčivost" je potřeba, aby jejich povrchy neobsahovaly oxidy kovů a tuky. Pro odstranění těchto nečistot se používají tavidla, které navíc pomáhají pro lepší roztékání pájky. [22] Uveďme několik příkladů tavidel:

- kalafuna - směs pryskyřičných kyselin;
- amoniak - NH_4Cl;
- kyselina fosforečná - H_3PO_4. [23]

Při zahříváni tavidel vznikají toxické látky, které mohou uškodit zdraví.

Pájka je slitinou kovů (např. cínu, olova, mědi nebo stříbra), jejichž teplota tavení je nízká. [24]

V případě pájení nekovových materiálů nejde použit tavidla, proto se používá technologie ultrazvukového pájení. [22]

1.2 Ultrazvuk

Technologie ultrazvukového pájení využívá energii ultrazvuku. Ultrazvukem je mechanické kmitání s frekvenci vyšší než hranice slyšitelného člověkem zvuku (cca 20 kHz). Aplikaci vlastností ultrazvukových vln se dá rozdělit na tři oblasti:

- **Výzkum struktury látek a jejich vlastností**
  Ultrazvuk se používá pro získání informací o procesech, dějících se v látkách na makro a mikro úrovních. Tyto informace se dá získat sledováním závislosti rychlosti šíření a doznívání akustických vln na těchto procesech.
- **Zpracovávání signálů**
  Různé oblasti radioelektroniky využívají ultrazvukové přístroje pro zpracování elektrických signálů.
- **Působení na látky**
  Ultrazvukové vlny mají schopnost měnit vlastnosti látek a ovlivňovat fyzické procesy, což se často využívá v oblasti průmyslových technologií.

Pracovní frekvence ultrazvukových vln vždy závisí na konkretním způsobu použití. V průmyslu se mohou využívat frekvence vyšší 100 MHz. [25]

V tomto projektu se bude využívat schopnost ultrazvuku působit na látky a ovlivňovat fyzické procesy. Tato vlastnost je podrobněji popsána v další podkapitole.

1.3 Ultrazvukové pájení

Ultrazvukové pájení je technologie spojování materiálů za pomoci ultrazvukové energie bez využití žádných chemických látek. Tato technologie se objevila ještě před rokem 1950 a používala se pro pájení hliníku bez tavidla. V současné době je vhodná i na pájení nekovových materiálů (např. skla, keramiky, kompozitních materiálů) a špatně pájitelných kovů. [2, 3]

Technologie ultrazvukového pájení využívá princip vibrace a kavitace (viz obr. 1.1). Hrot ultrazvukové páječky je schopen se zahřát do teploty 450°C. Po zahřátí na určitou teplotu hrot roztaví pájecí slitinu, skrz kterou volně procházejí ultrazvukové vlny (vibrace). Když tyto vibrace dosáhnou hranici mezi tvrdým a kapalným materiály, zahájí se proces kavitace. Je to proces vzniknutí dutin v kapalině (v případě pájení - v roztavené slitině), praskajících pod vlivem atmosférického tlaku, což způsobuje uvolnění velkého množství energie. Výsledkem daného procesu je odstranění oxidační vrstvy z povrchu základního materiálu, což vede k dobré reakci tohoto materiálu s pájecí slitinou. [1]

Díky erozivnímu působení ultrazvuku na pájený materiál v něm vznikají mikropóry, kam může zatéct pájecí slitina, což spolu s kavitačním procesem vede ke vzniku pevného spoje.

Při pájení ultrazvukem se používá tak zvaná "aktivní" pájecí slitina, obsahující kovy, které se dobře chemicky váží s kyslíkem (např. titan, chrom, zirconium). Jejich reakce

Obrázek 1.1: Proces ultrazvukového pájení [10]

vytváří oxidy, díky nimž dochází k chemické vazbě mezi slitinou a substrátem. To je dalším důvodem proč tuto technologii se dá použit na pájení obtížně pájitelných materiálů. [8]

1.3.1 Výhody

Hlavní výhodou ultrazvukového pájení je možnost spolehlivě spojovat různé kovové a nekovové materiály.

Dalším plusem je to, že bubliny, vzniklé v roztavené pájecí slitině, se vytěsňují kvůli působení ultrazvukových vibrací. Díky tomu se vytváří rovnoměrný a tenký pájený spoj bez dutin.

Poslední výhodou je skutečnost, že na rozdíl od klasického pájení, ultrazvukové nepotřebuje využití tavidla. Proto danou technologii považujeme za ekologickou. [8]

1.3.2 Využití v průmyslu

Technologie ultrazvukového pájení se využívá v leteckém a kosmickém průmyslu, ve vyrobě elektronických prvků, ve vojenském průmyslu, pro výrobu některých medicínských přístrojů. [8]

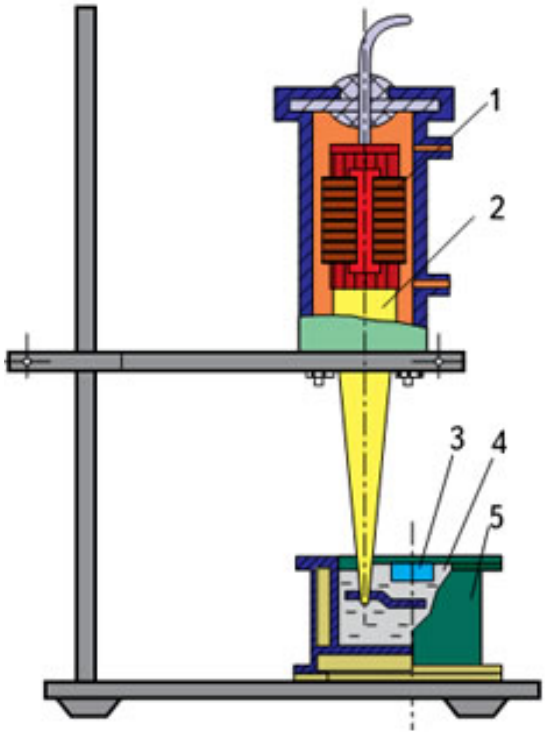
Kapitola 2

Teoretická část

2.1 Konstrukce ultrazvukové páječky

Proces ultrazvukového pájení může být proveden buď pomocí pájecí lázně nebo pomocí ultrazvukové páječky, jejíž výroba je cílem této práce.

Vybavení pro pájení ultrazvukem se skládá z topného elementu pro tavení slitiny, ultrazvukového převodníku, hrotu pro přenos ultrazvukových vibrací a generátoru ultrazvukových vln (viz obr. 2.1). [1]



Obrázek 2.1: Ultrazvuková páječka: 1 - UZ převodník;
2 - hrot; 3 - pájený materiál; 4 - pájka;
5 - topný element [11]

Ve vyráběném pájecím systému roli zdroje napájení pro ultrazvukový převodník hraje ultrazvukový generátor, skládající se ze dvou částí: generátoru signálů a výkonového zesilovače. Generátor signálů vytváří signál s určitou frekvencí, která se rovná pracovní frekvenci převodníku. Pak tento signál, zesílený výkonovým zesilovačem, se do převodníku posílá. [7]

2.1.1 Požadavky na vybavení pro pájení ultrazvukem

Součástky pájecího systému musí plnit následující podmínky: musí mít dobrou tepelnou vodivost, vysokou tepelnou odolnost a odolnost proti působení roztavené pájecí slitiny, aby se vyhnulo její znečištění produkty eroze a leptaní součástek touto slitinou. [1]

2.2 Ultrazvukový převodník

Ultrazvukový převodník nebo ultrazvukový měnič je přístroj schopny měnit elektrickou energii na energii ultrazvuku a opačně. Tyto měniče se dají rozdělit na tři skupiny: magnetostrikční, kapacitní, piezoelektrické. [7]

2.2.1 Magnetostrikční převodník

V magnetostrikčních převodnících se obvykle používají feromagnetické látky. Tyto látky mají schopnost měnit svoji velikost pod vlivem střídavého magnetického pole. Změna směru magnetického pole umožňuje generaci mechanického vlnění o frekvenci ultrazvuku. Tato frekvence se pohybuje v rozmezí 18 - 26 kHz a čím je vyšší, tím více působí kavitace na pájený materiál. Nedostatkem magnetostrikčních měničů je jejich citlivost na teplotu. Pokud se zahřejí na teplotu 80 - 95°C, ztratí schopnost generovat ultrazvukové vlny. [1]

2.2.2 Kapacitní převodník

V kapacitních převodnících mezi vodivou membránou a podložkou působí variabilní elektrostatické pole. Pole způsobuje vibraci vodivé membrány, což při vysokých frekvencích generuje ultrazvuk. [7]

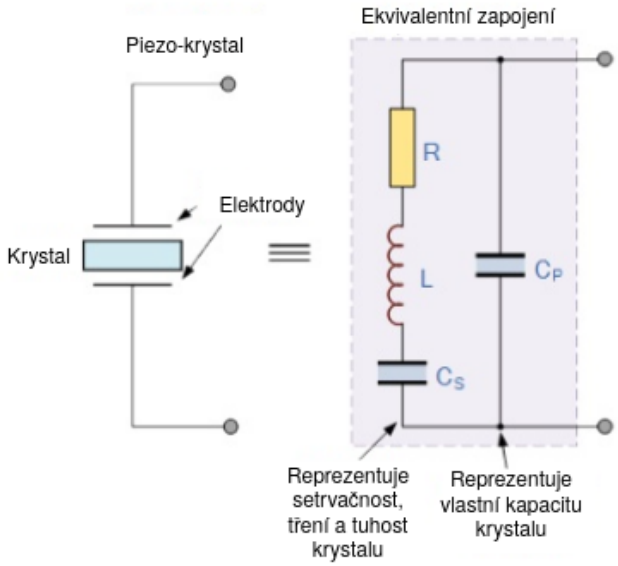
2.2.3 Piezoelektrický převodník

Základem principu práce piezoelektrických převodníků je piezoelektrický jev. Je to schopnost krystalů vytvářet elektrické napětí změnou svoji velikosti a tvaru. Proto při výrobě těchto převodníků se používají speciální látky, např. krystaly turmalínu a křemene nebo polykrystalické materiály. Tyto látky se deformují vlivem elektrického napětí. Piezoelektrické přistroje obvyklé tvoří vlnění o frekvencích v rozmezí 20

- 60 kHz. Mají vyšší tepelnou odolnost a vyšší účinnost oproti magnetostrikčním měničům. [1]

Obrázek 2.2: Piezo-měnice

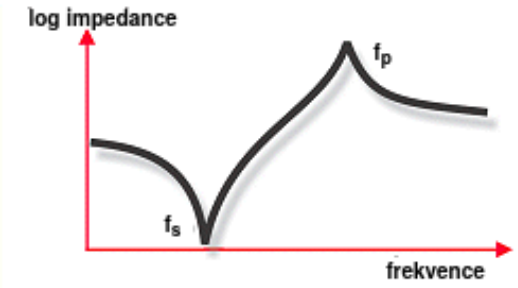
V současné době se nejčastěji používají piezoelektrické měniče, neboť mají řadu výhod: energetická účinnost může dosáhnout až 80 %; může být snadno vyroben do různých tvarů; je levný; má stabilní výkon. [7] Z těchto důvodu byl piezo-měnic využit i v tomto projektu. Příklady piezoelektrických měničů a jejich ekvivalentní elektrické zapojení je vidět na obrázcích č. 2.2 a 2.3.



Obrázek 2.3: Ekvivalentní elektrické zapojení piezo-měniče [27]

Každý piezo-měnič má vlastní rezonanční kmitočet, který závisí na jeho fyzických vlastnostech a tvaru. Obvykle tlustší přístroj stejného tvaru má nižší rezonanční kmitočet. Na tomto kmitočtu proces převodu energie probíhá nejefektivněji, protože impedance převodníku je minimální. Na obrázku č. 2.4 je zobrazen graf závislosti

impedance piezo-měniče na frekvenci, kde f_s je rezonanční (minimum impedance) a f_p je anti-rezonanční frekvence (maximum impedance). [26]

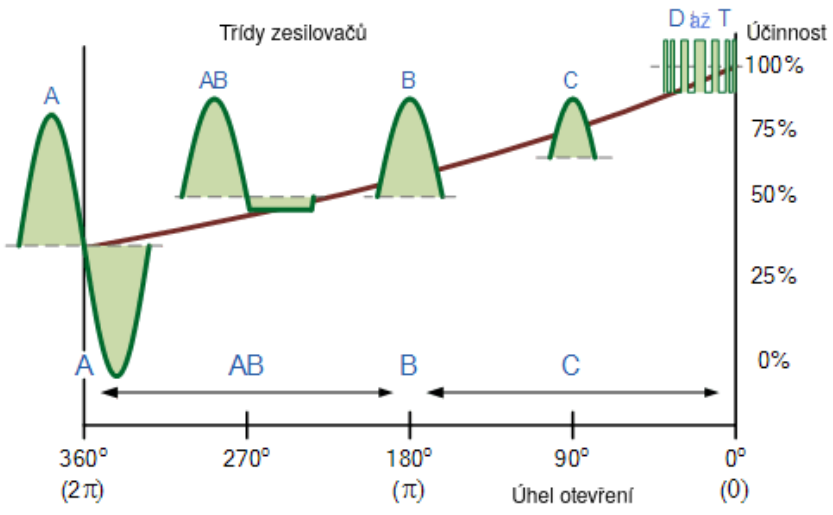


Obrázek 2.4: Závislost impedance na frekvenci [26]

2.3 Výkonový zesilovač

Jednou z nejdůležitějších částí výroby generátoru ultrazvuku je volba vhodného zesilovacího prvku, sloužícího pro zesílení vstupního signálu za účelem přenosu požadovaného množství energie do ultrazvukového převodníku. V této kapitole budou popsány a porovnány různé techniky zesílení výkonu, jedna z nichž bude následně použita v daném projektu.

Výkonové zesilovače mají řadu vlastností, kterými se budeme řídit při volbě vhodného pro daný projekt zesilovače: linearita, zesilovací činitel, účinnost a výstupní výkon. Nejpopulárnější ze způsobů klasifikace zesilovačů výkonu je



Obrázek 2.5: Porovnání výkonových zesilovačů [6]

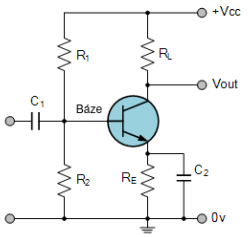
rozdělení na třídy. Třídu zesilovače určují provozní režim kaskády tranzistorů a parametry prvků, které obsahuje zapojení. Tímto způsobem výkonové zesilovače se dá rozdělit do dvou skupin. K první skupině patří zesilovače typu A, B, AB a C,

jejichž provozní režim závisí na zvoleném úhlu otevření tranzistoru. Druhá skupina obsahuje výkonové zesilovače s tranzistory pracujícími ve spínacím režimu: D, E, F, G, S, T atd. [4]

2.3.1 Zesilovače závislé na úhlu otevření tranzistorů

Výkonový zesilovač třídy A

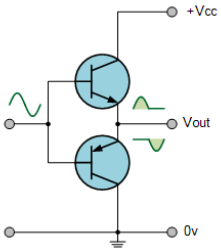
Výkonový zesilovač třídy A má jednoduchou konstrukci, vykazuje vysokou linearitu (malé zkreslení) a vysoký stálý příkon, protože vždy pracuje v lineární části své charakteristiky. V jeho konstrukci je použit bipolární tranzistor, jehož úhel otevření se rovna 360°, což znamená, že přes tento tranzistor stále teče proud. To vede k velké ztratě energie a vytváření obrovského množství tepla. Odsud plynou dvě velké nevýhody zesilovače třídy A: nízká účinnost a přehřívání, při němž může dojít k poškození obvodu. Účinnost takového zesilovače může klesnout až k 25 %. [4]



Obrázek 2.6: Schéma zapojení zesilovače třídy A [6]

Výkonový zesilovač třídy B

Nejjednodušší zapojení zesilovače třídy B obsahuje dva doplňkové bipolární tranzistory, každý z nichž zesiluje jednu půlvlnu vstupního signálu. Úhel otevření těchto tranzistorů je 180°.



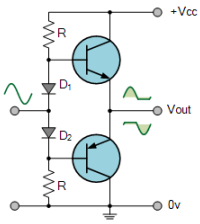
Obrázek 2.7: Schéma zapojení zesilovače třídy B [6]

Jeden z nich pracuje s kladnými výstupními úrovní, druhý - se zápornými, na výstupu zpracované signály se spojují do jednoho. Takový princip práce zesilovačů

této třídy zvyšuje jejích účinnost ve srovnání se zesilovači třídy A: může dosáhnout hodnoty 78,5 %. [9] Ale zesilovače třídy B mají velkou nevýhodu: v oblasti, kde výstupní signál prochází nulou, vzniká zkreslení. [4]

Výkonový zesilovač třídy AB

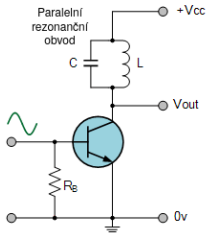
Nejpoužívanější zesilovače jsou zesilovače třídy AB, které slučují v sobě vlastnosti tříd A i B: malé nízké tepelné ztráty, vysokou účinnost a poměrně vysokou linearitu. Úhel otevření tranzistorů těchto zesilovačů se pohybuje mezi 180° a 360° Tak každý tranzistor zesiluje více než půlvlny vstupního signálu, což vede ke zmenšení přechodového zkreslení. [4] Kvůli zvýšení linearity vykazují dané zesilovače menší účinnost, než zesilovače třídy B: obvykle se jejích účinnost pohybuje v rozsahu 60 - 65 %. [9]



Obrázek 2.8: Zapojení zesilovače třídy AB [6]

Výkonový zesilovač třídy C

Úhel otevření tranzistoru zesilovačů, pracujících ve třídě C, se pohybuje v intervalu 0° až 180°. To znamená, že tranzistor je zavřen déle než doba půlperiody vstupního signálu, což vede ke zmenšení ztráty energie. Teoretická účinnost daných zesilovačů může dosáhnout hodnoty 100 %, ale přitom výstupní signál trpí velkým zkreslením. [4]

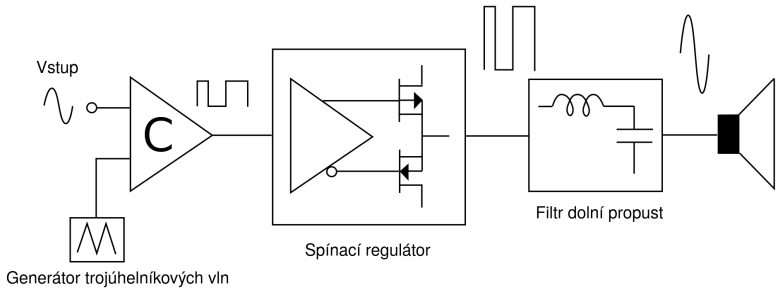


Obrázek 2.9: Schéma zapojení zesilovače třídy C [6]

2.3.2 Spínací zesilovače

Výkonový zesilovač třídy D

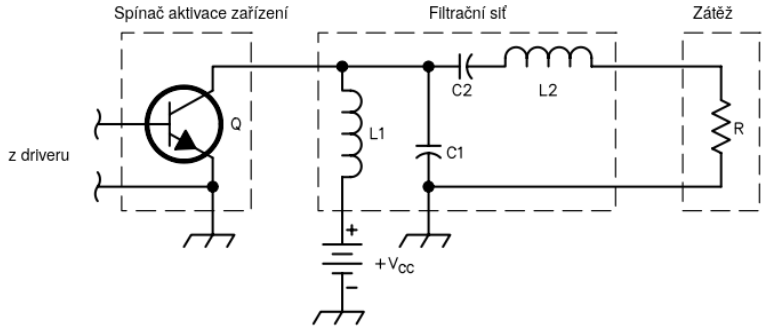
Zesilovače třídy D patří k nelineárním zesilovačům, pracujícím ve spínacím režimu: výstupní tranzistory jsou buď úplně otevřené nebo zcela zavřené. Tímto způsobem může účinnost těchto zesilovačů dosáhnout hodnoty více než 90 %. Při zpracování signálu se používá filtr typu dolní propust, který nepropouští složky signálu s vysokými frekvencemi, a technika pulzně šířkové modulace nebo delta modulace pro zmenšení přechodového zkreslení. Avšak je toto zkreslení pořád větší, než zkreslení dosahující se pomocí zesilovačů tříd A a AB. Kromě dobré účinnost mezi výhody zesilovače ve třídě D patří malý rozměr a nízké zahříváni. [5]



Obrázek 2.10: Blokový diagram spínacího zesilovače třídy D [2]

Výkonový zesílováč třídy E

Zesilovač třídy E je dalším zesilovačem pracujícím ve spínacím režimu. Na obrázku č. 2.11 je vidět, že na rozdíl od zesilovačů třídy D využívá jenom jeden unipolární tranzistor a ladicí síť pro odfiltrování vyšších harmonických. Aby nedocházelo ke ztrátám energie, tyto zesilovače používají techniky ZVS (zero-voltage switching) a ZDS (zero-derivative switching), díky čemu může teoretická účinnost zesilovačů třídy E dosáhnout 100 %. Nevýhodou zesilovačů tohoto typu je nutnost využití vysokofrekvenční tlumivky pro omezení proudových vln vznikajících kvůli spínání. [9]



Obrázek 2.11: Schéma zapojení zesilovače třídy E [12]

2.3.3 Použitý výkonový zesilovač

Základem zesilovacího prvku vybraného pro tento projekt je zesilovač třídy D. Vybraná součástka je polovičním můstkem, obsahujícím dva N-MOSFET transistory, ochranu proti přehřívání, ochranu anti-cross neumožňující sepnout dva transistory ve stejný okamžik a gate driver potřebný ke generování vysokého proudu pro řídicí elektrodu transistoru. [9] Podrobnější popis tohoto zesilovacího prvku je v podkapitole č. 3.2.

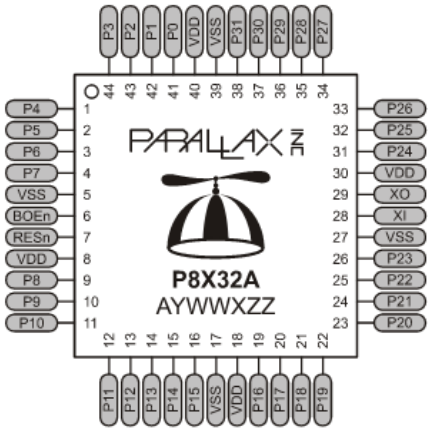
Kapitola 3

Praktická část

3.1 Vývojová deska

V tomto projektu musí být použitá vývojová deska obsahující mikrokontrolér, který bude hrát roli generátoru pulzních signálů o frekvenci do 60 kHz. Musí být přitom schopen generovat tyto signály současně. Kromě toho bude mikrokontrolér sloužit k ovládání dalšího hardwaru. To znamená, že musí obsahovat dostatečný počet I/O pinů.

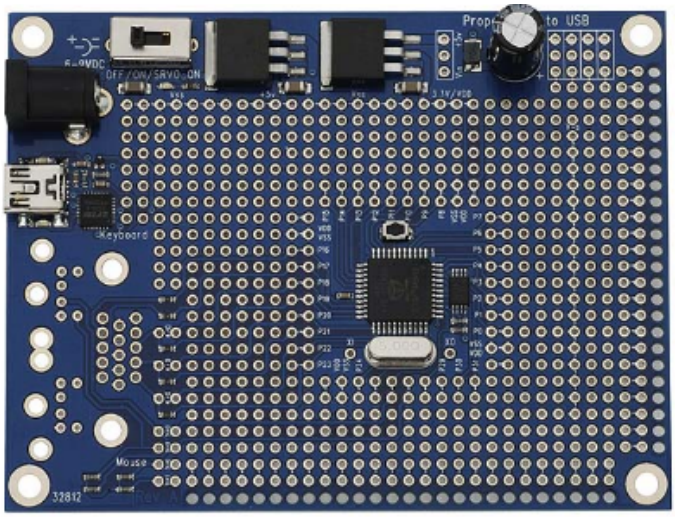
Tyto podmínky zcela splňuje vývojová deska Propeller Proto Board USB od společnosti Parallax (viz obr. 3.2) s mikrokontrolérem P8X32A-Q44 Propeller čip (viz obr. 3.1). Tento mikrokontrolér je rychlý, kompaktní a docela levný. Má 32



Obrázek 3.1: P8X32A-Q44 Propeller čip [15]

I/O pinů, což stačí pro připojení potřebného hardwaru. Obsahuje 8 jader (Cogs), které jsou schopny vykonávat několik nezávislých procesů paralelně. Jejích činnost kontroluje přepínač HUB tak, že řadí jádra do fronty, aby nejvíce 1 Cog měl přístup ke vzájemně se vylučujícím procesům v daný okamžik. Maximum systémových hodin je 80 MHz, což nám také vyhovuje. Vyžadované napájení čipu je 3,3 VDC. Napájí se od počítače přes USB kabel. Programování Propeller čipu je uživatelsky snadno

pochopitelné. Provádí se v jazycích SPIN a Propeller Assembly. Program se následně nahrává do mikrokontroléru přes USB. [15]



Obrázek 3.2: Propeller Proto Board USB [16]

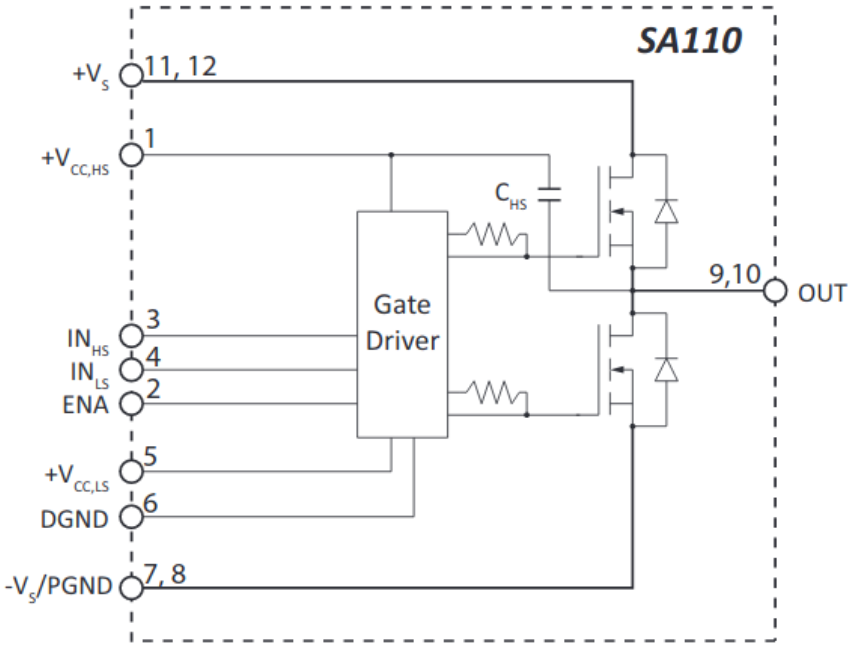
Kromě mikrokontroléru Propeller Proto Board obsahuje LM1086 5 V a 3,3 V regulátory, poskytující až 1,5 A proudu při napájecím napětí 6-9 VDC. Napájí se pomoci AC/DC adaptéru s výstupním napětím 6 VDC. [16]

3.2 Zesilovací prvek

Zesilovací prvek, který se bude používat v této práci, musí, jako ostatní součástky, splňovat určité požadavky: má mít dost vysokou účinnost a linearitu, nesmí se přehřívat, jeho konstrukce má být kompaktní.

Jedním ze zesilovačů splňujících tyto podmínky je spínací modul s polovičním H-můstkem SA110 DP od Apex Microtechnology. V jeho zapojení jsou použity tranzistory typu MOSFET (viz obr. 3.3) s technologií karbidu křemíku (SiC), což přináší tomuto zesilovači řadu výhod oproti křemíkovým zesilovačům. Mezi tyto výhody patří velká šířka zakázaného pásu, která umožňuje práci při vysokých teplotách, a spolu s vysokým průrazným napětím zajišťuje nižší spínací ztráty a vyšší účinnost výkonové součástky; vyšší tepelná vodivost zaručuje dobrý odvod tepla a efektivní chlazení součástky. [13]

SA110 vynikuje integrovaným MOSFET gate driverem, potřebným ke generování vysokého proudu pro řídicí elektrodu transistoru, a dost vysokou spínací frekvencí až 400 kHz. Podpěťovou ochranu zesilovače zajišťuje UVLO (Undervoltage-lockout) obvod, který při poklesu napětí pod hodnotu 9 V přepíná výstup do vysoké impedance. Pokud se napájecí napětí zvýší nad hodnotu 10 V, můstek bude pracovat v normálním režimu. Zkreslení výstupního signálu se zmenšují pomocí technologie "active Miller clamping". [14]

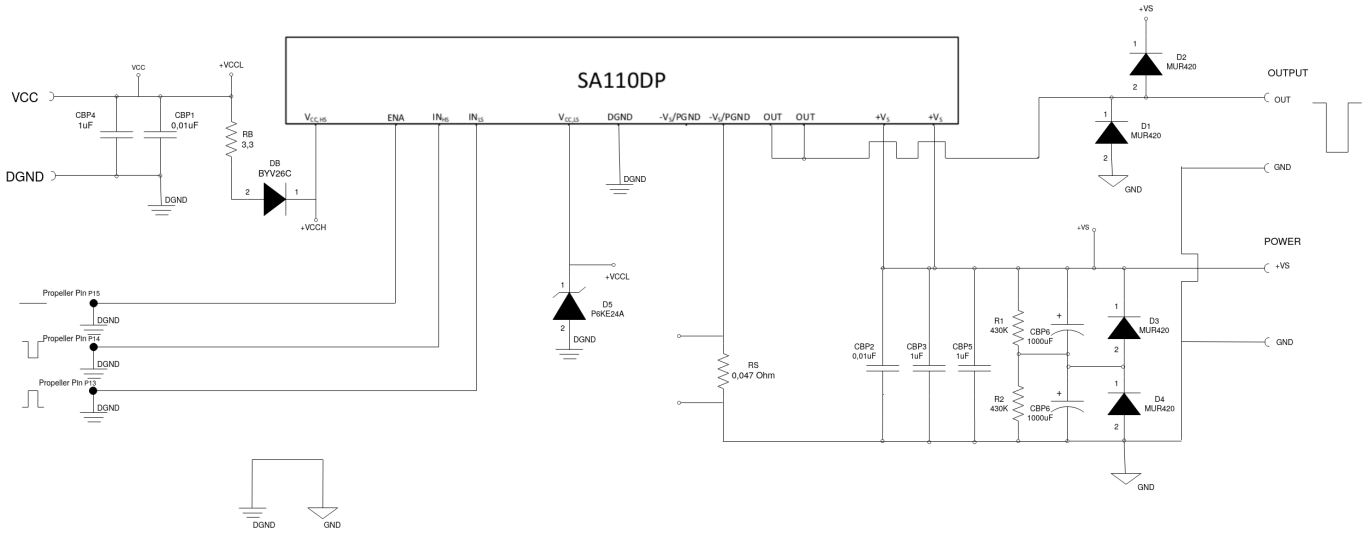


Obrázek 3.3: Blokový diagram SA110 [14]

Jak již bylo napsáno, tento modul je ideální variantou pro práci při vysokých teplotách. Avšak abychom se jistě vyhnuli jakémukoliv poškození obvodu, budeme používat zapojení znázorněné na obrázku č. 3.4, obsahující další ochranné součástky popsané v tabulce č. 3.1. Navíc přišroubujeme můstek ke chladiči (viz obr. 3.5).

Název	**Kód výrobce**	**Popis**
REZISTORY		
R1, R2	MF0207434FTB	430kΩ, 0,6W, 1%
RB	MF02073R3FTB	3,3Ω, 0,6W, 1%
RS	-	0,047Ω, 4W, 5%
DIODY		
D1, D2, D3, D4	MUR420RLG	Dioda, 200V, 4A
D5	P6KE24A	TVS, 24V
DB	BYV26C	Dioda, 600V, 1A
KONDENZÁTORY		
CBP1, CBP2	CIIE103M2HF5T	Keramický, 10nF, 500V
CBP3, CBP5	MKS4C041002E00KSSD	Fóliový, 1µF, 63V
CBP4	-	1µF
CBP6, CBP7	EXR102M2AB	Elektrolytický, 1000µF, 100V

Tabulka 3.1: Součástky pro zapojení zesilovácího prvku



Obrázek 3.4: Zapojení SA110 [28]

Obrázek 3.5: SA110 přišroubovány ke chladiči

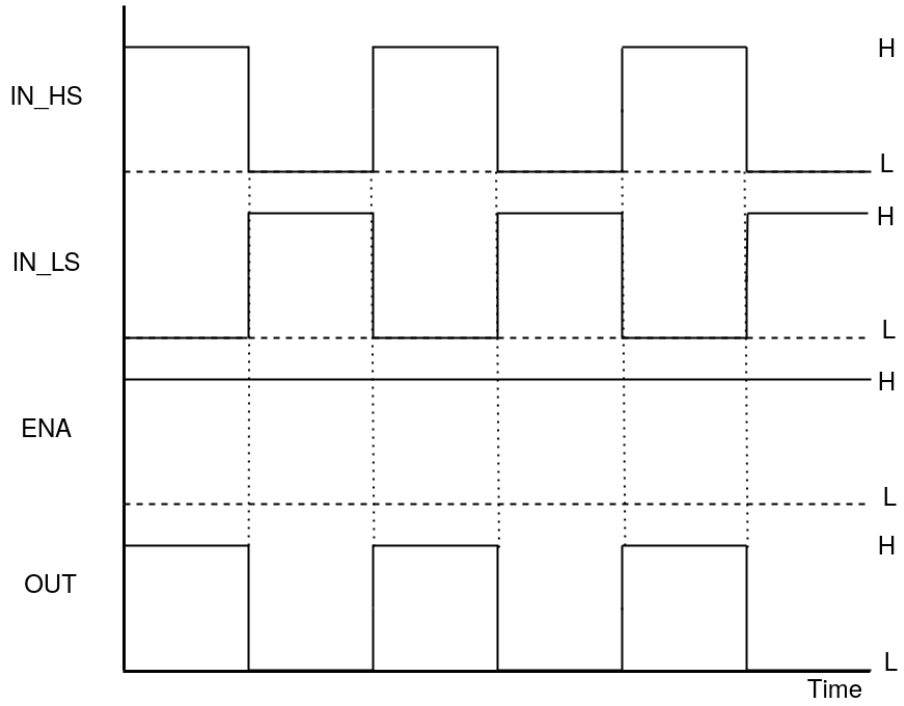
3.2.1 Řídicí signály

Pro řízení zesilovacího prvku SA110 budeme potřebovat tři signály generované mikroprocesorem Propeller Proto Board USB, který byl popsán v podkapitole 3.1. Na piny můstku IN_{HS} a IN_{LS} (viz obr. 3.4) pošleme čtvercové signály, které jsou logickými vstupy pro ovládání vysoké/nízké úrovně SiC MOSFETů. Na pin ENA (Enable pin) bude poslán signál umožňující práci Gate driveru. Závislost výstupů na těchto třech signálech je popsána v logické tabulce č. 3.2.

Pošleme na vstupy IN_{HS}, IN_{LS} zesilovacího prvku dva inverzní signály (jejích frekvenční posun je T/2, pracovní cyklus je 50 %) a na vstup ENA - logickou jedničku. Na výstupu OUT obdržíme signál, znázorněný na obrázku č. 3.6.

ENA	IN_{HS}	IN_{LS}	OUT
L	X	X	Vysoká impedance
H	L	L	Vysoká impedance
H	H	L	$+V_S$
H	L	H	$-V_S$/PGND
H	H	H	Vysoká impedance

Tabulka 3.2: Logická tabulka vstupů a výstupů,
kde L - nízká úroveň, H - vysoká úroveň, X - žádný signál



Obrázek 3.6: Graf vstupů a výstupů

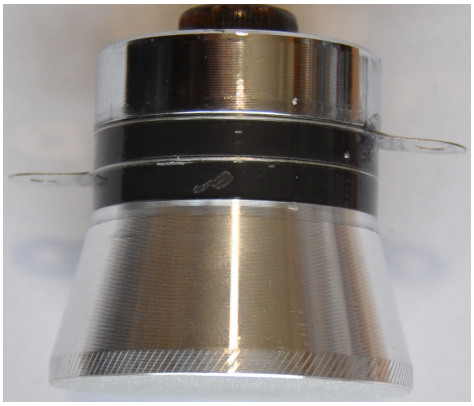
3.3 Mechanická část

Mechanická část ultrazvukové páječky se skládá z ultrazvukového převodníku, držáku, hrotu a topného odporového tělíska.

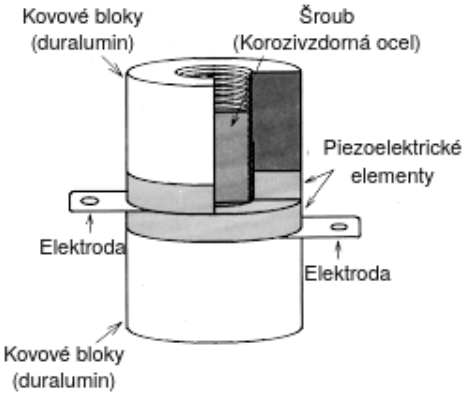
3.3.1 Ultrazvukový převodník

Ultrazvukový převodník, který byl použit v této práci, je piezoelektrický
(viz obr. 3.7).

Jeho rezonanční frekvence je cca 40 kHz, příkon je 60 W. Tento piezo-měnič slouží k převodu zesíleného elektrického signálu do ultrazvukové energie pomocí piezoelektrických krystalů. Je připojen na výstup polovičního můstku (viz obr. 3.8).

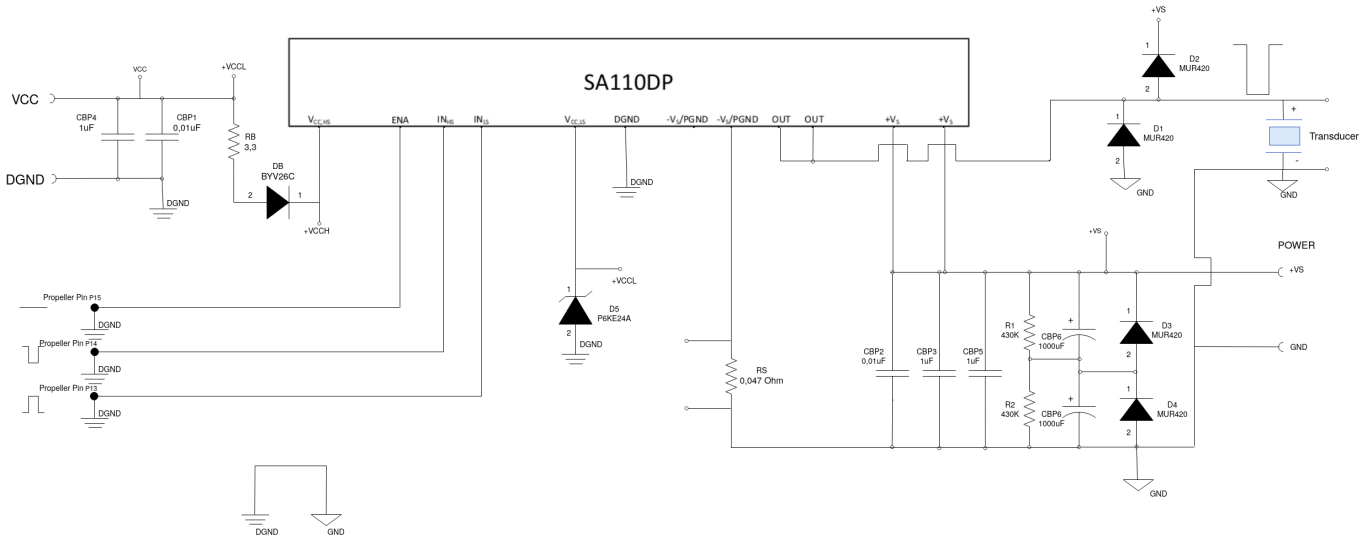


(a)



(b) [29]

Obrázek 3.7: Piezo-měnič



Obrázek 3.8: Zapojení můstku s piezo-měničem [28]

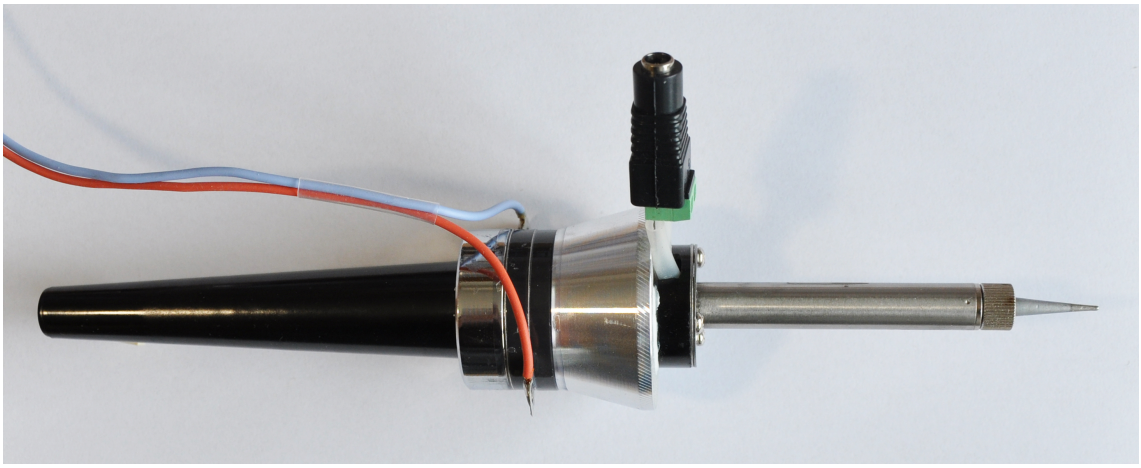
3.3.2 Topné tělísko

Pro obdržení topného tělíska a držáku byla použitá neregulovaná odporová páječka, rozdělena pilou na dvě části. Toto tělísko má příkon 40 W při napájení 12 V. Pro pájení použité pájecí slitiny, která je popsána v podkapitole č. 4.4.1, používáme teplotu hrotu o trochu výšší než 217°C. Potřebné napájecí napětí odporového tělíska je cca 9.9 V. Teplota hrotu pájky není regulována, nastavuje se ručně napětím z regulovatelného stejnosměrného napájecího zdroje. K měření teploty hrotu se používá teploměr určený pro tyto účely (viz obr. 3.9). Deklarovaná přesnost teploměru je ±2°C.

Piezo-měnič byl umístěn a lepením zafixován mezi topnou část a držák (viz obr. 3.10). Pro lepení bylo použito dvousložkové epoxidové vysokoteplotní lepidlo Panacol Structalit 3446, které trvale odolává teplotě 300°C, krátkodobě 530°C [18].

(a) (b)

Obrázek 3.9: Teploměr



Obrázek 3.10: Mechanická část ultrazvukové páječky

3.4 Zdroje napájení

Pro výrobu pájecího systému v rámci projektu je potřeba několik zdrojů napájení pro různé součástky. Dva zdroje - pro zesilovací prvek, jeden - pro napájení topného odporového tělíska.

3.4.1 SPS-9600

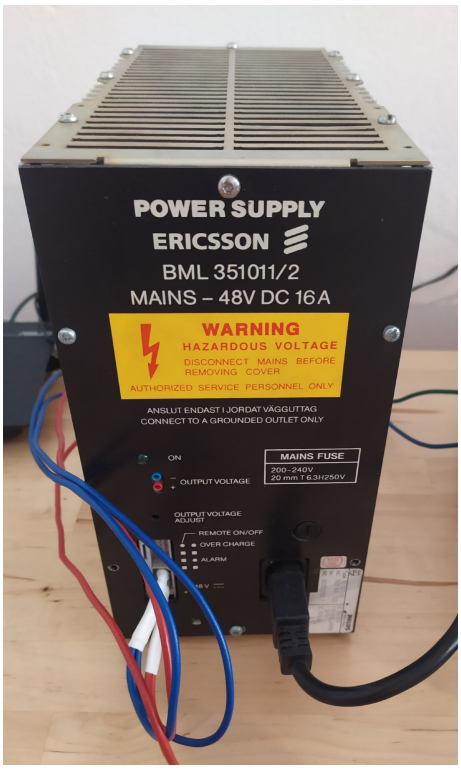
Jedním z použitých zdrojů je vysoko-proudový přepínací napájecí zdroj SPS-9600 s rozsahem výstupního napětí 1 - 15 V (viz obr. 3.11). [19] Jeden zdroj tohoto typu slouží k napájení součástek zesilovacího prvku, druhý k napájení topného tělíska ultrazvukové páječky a k regulování teploty jejího hrotu. Na schématu polovičního můstku SA110 (viz obr. 3.3) je vidět dvě vstupní napětí: V_{CC} - pro napájení digitálních prvků obvodu a V_S - pro napájení výkonových prvků (tranzistorů). Digitální prvky se napájí pomoci již popsaného zdroje SPS-9600: hodnota V_{CC} je nastavena na maximální 15 V.

Topné odporové tělísko napájí tentýž zdroj, optimální hodnota napájecího napětí se rovná 10,3 V.

Obrázek 3.11: Zdroj napětí SPS-9600

3.4.2 BML 351011/2

Třetím zdrojem napájení je BML 351011/2 s neregulovaným výstupním napětím 48 V (viz obr. 3.12). Slouží k napájení výkonové části zesilovacího prvku SA110DP, následně i k napájení připojené zátěže (piezo-měniče). Na obrázku č. 3.3 je to napětí V_S.



Obrázek 3.12: Zdroj napětí BML 351011/2

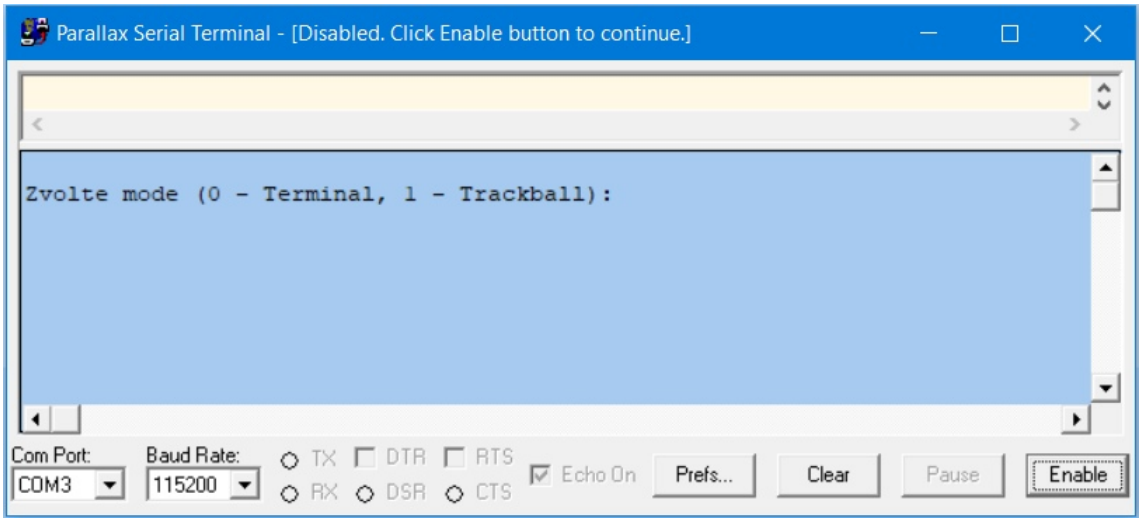
3.5 Uživatelské rozhraní

Uživatel vyrobené ultrazvukové páječky bude mít možnost nastavit frekvenci výstupního ultrazvukového signálu a to dvěma způsoby: buď pomocí Trackball modulu od společnosti Parallax anebo přes Sériový Terminál. Software, který to umožňuje, je přiložen k bakalářské práci.

3.5.1 Sériový terminal

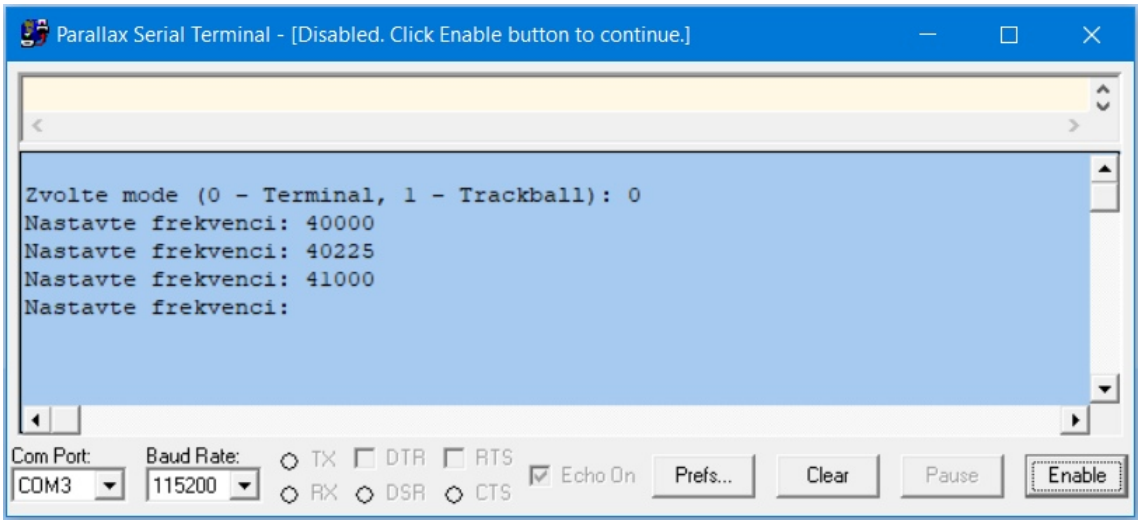
Komunikaci mezi mikrokontrolerém a počítačem přes USB zajišťuje Sériový Terminal Parallax. Stačí uvést v Terminálu port, na který je připojen Propeller čip, a přenosovou rychlost (Baud rate), která se rovná 115200.

Po nahrání programu do mikrokontroléru se na Terminálu vypíše žádost o zvolení módu: mode č. 0 odpovídá za ovládání čipu přes Sériový Terminál, mode č. 1 - za ovládání čipu pomocí Trackballu (viz obr. 3.13).



Obrázek 3.13: Sériový terminál Parallax - žádost o zvolení modu

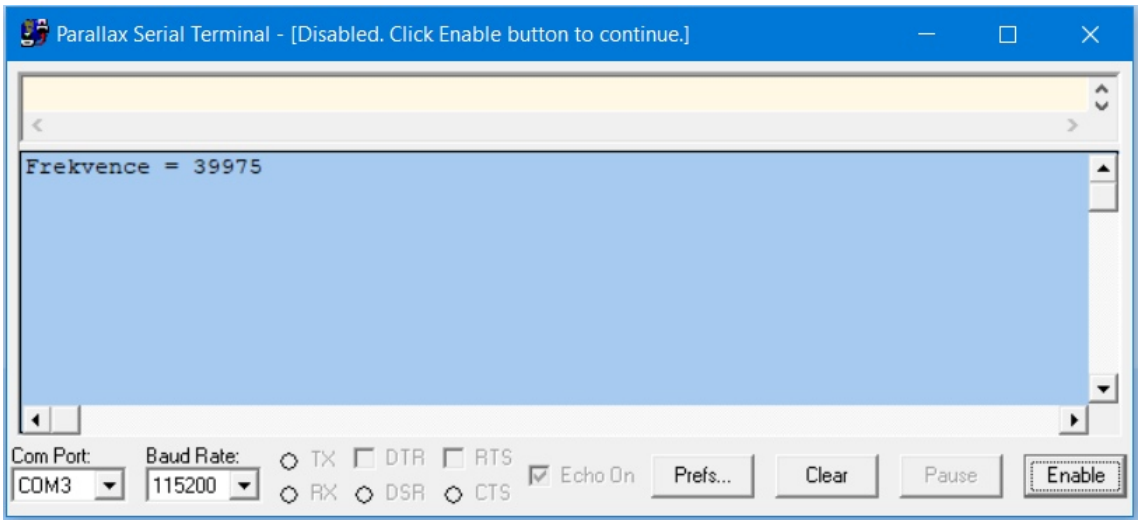
Pokud byl zvolen nultý mode, Terminál nabídne uživateli nastavit výstupní frekvenci v Hertzech (viz obr. č 3.14)



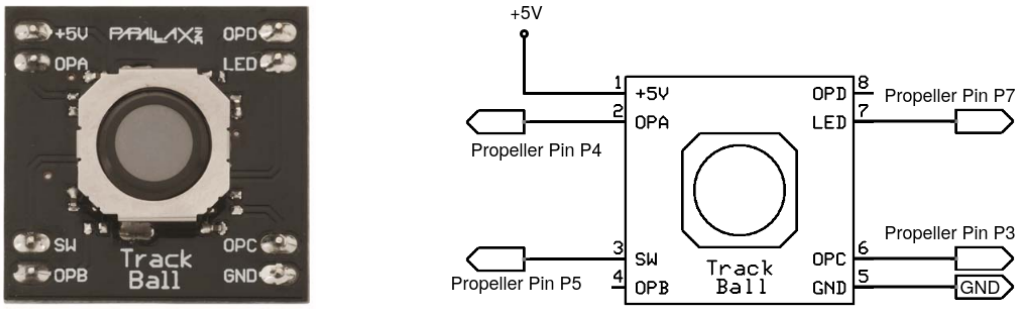
Obrázek 3.14: Sériový terminál Parallax - mode č. 0

3.5.2 Trackball modul

Při zvolení modu č. 1 ovládání Propeller čipu se bude provádět pomocí Trackball modulu, který se rozsvítí červeně. Trackball modul je součástí uživatelského rozhraní, které může být použito namísto joysticku nebo myši (viz obr. 3.16-a).
V tomto projektu se bude používat pro regulování ultrazvukové frekvence: při otáčení kuličky směrem nahoru se výstupní frekvence zvýší, při otáčení dolu - sníží. Její hodnota se bude vypisovat v Hertzech na Terminálu (viz obr. 3.15). Frekvenci se dá nastavit v rozsahu od 15 kHz do 60 kHz s rozlišením 25 Hz. Schéma připojení modulu k vývojové desce je znázorněna na obrázku č. 3.16-b.



Obrázek 3.15: Sériový terminál Parallax - mode č. 1



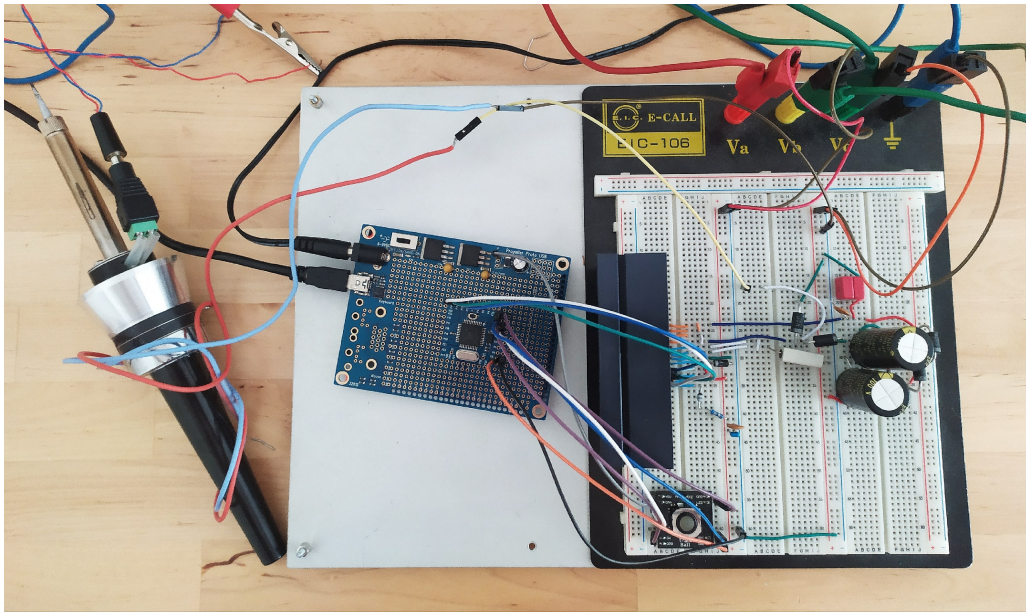
(a) (b)

Obrázek 3.16: Trackball modul [17]

Kapitola 4

Experementální čast

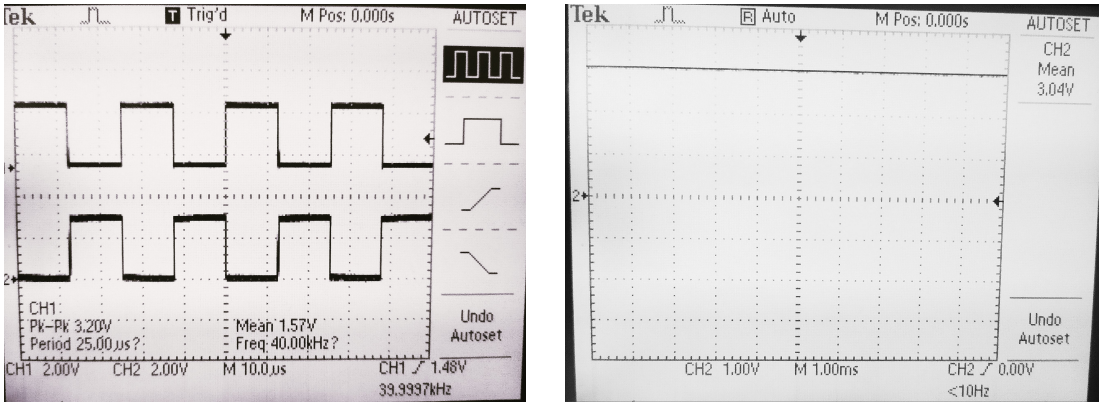
V této kapitole budou popsány testy vyrobené ultrazvukové páječky, které pomohly ověřit její funkčnost. Na obrázku č. 4.1 je znázorněné celé zapojení vyrobeného pájecího systému, který byl otestován po částech. K testování byl použit digitální osciloskop TDS1002 od společnosti Tektronix se dvěma kanály.



Obrázek 4.1: Osciloskop TDS1002

4.1 Testování generování eletrických pulzů

První, co se muselo zkontrolovat, je správná funkčnost generátoru elektrických pulzů (mikrokontroléru). Byly sledovány řídicí signály na výstupních pinech mikrokotroléru (P13, P14, P15), jejíchž požadovaný průběh lze vidět na obrázku č. 3.6. Skutečné průběhy jsou zobrazeny na obrázku č. 4.2.



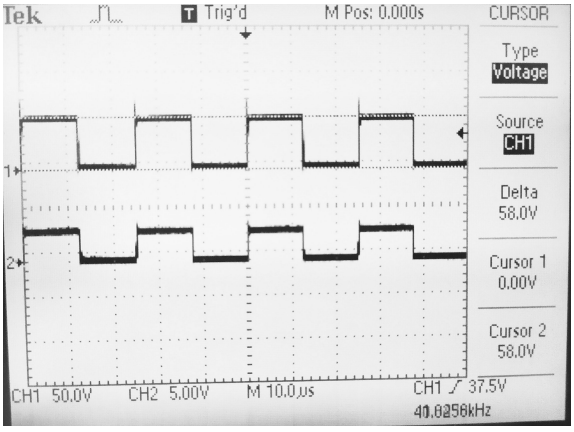
(a) (b)

Obrázek 4.2: Signály na pinech P14, P13 (a) a P15 (b)

Je vidět, že generátor funguje správně: na pinech P14 a P13 mikrokontroléru jsou inverzní pulzní signály, na P15 - logická jednička. Frekvenci výsledných signálů se dá měnit tak, aby se rovnala frekvenci ultrazvukového převodníku. Test se prováděl na frekvenci 40 kHz. Amplituda signálů je 3,04 V, což je dostačující pro zesilovací prvek jimi řízený.

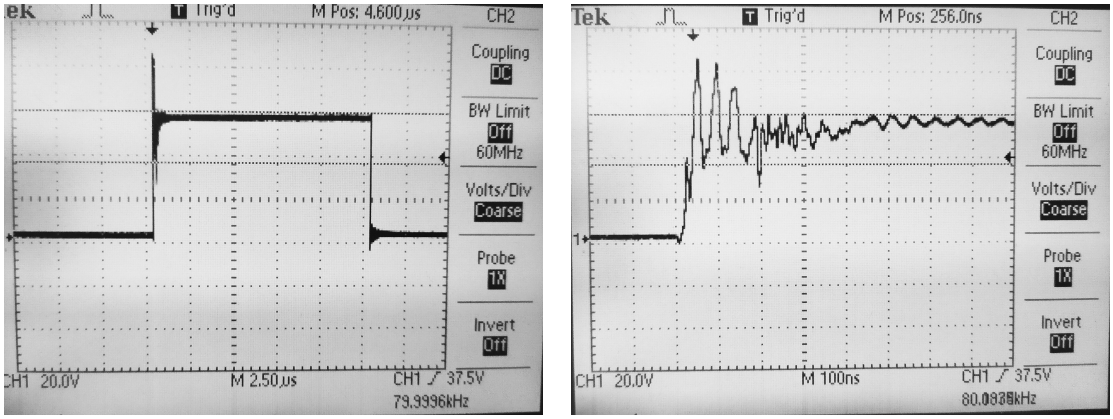
4.2 Testování zesilovacího prvku

Dále bylo potřeba ověřit funkčnost zapojení s polovičním můstkem SA110 (viz obr. 3.8). Měřil se výstup mezi OUT a GND, zátěž nebyla připojena. Očekávaným výstupním signálem je zesílený signál, který se posílá z pinu P14 mikrokontroléru na pin IN_{HS} můstku. Na obrázku č. 4.3 je vidět průběh tohoto signálu spolu s průběhem signálu na pinu mikrokontroléru.



Obrázek 4.3: Průběhy signálů na výstupu SA110DP (kanál 1) a na P14 (kanál 2)

Je vidět, že na výstupu polovičního můstku jsme obdrželi pulzní signál zesílený na 58 V se stejnou frekvencí jako původní. Z toho plyne, že zapojení funguje. Pokud se podíváme na tento zesílený signál zblízka (viz obr. 4.4), bude vidět, že obsahuje vysokofrekvenční doznívající zákmity.



(a) (b)

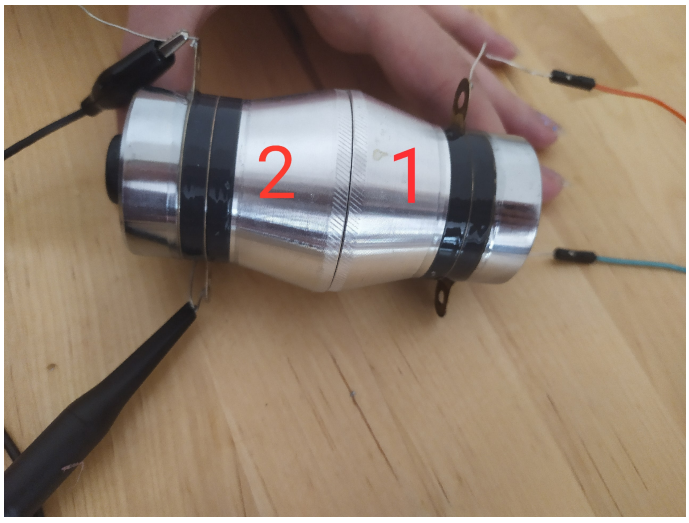
Obrázek 4.4: Signál na výstupu SA110DP

Tyto zákmity byly způsobeny tím, že nemáme kompaktní uspořádání elektroniky, protože k propojování součástek používáme nepájivé kontaktní pole. Delší propojky mezi součástkami vytváří parazitní indukčnosti a kapacity, což ovlivňuje průběh napětí na výstupu zesilovacího prvku.

4.3 Testování piezo-měniče

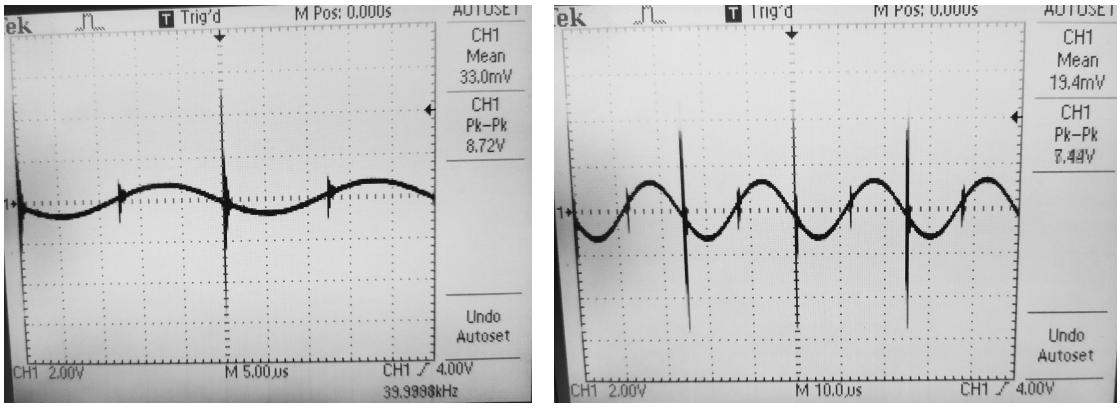
Po kontrole zapojení se zesilovacím prvkem na jeho výstup byla přípojena zátěž - piezo-měnič (viz obr. 3.8).

Jak již bylo vysvětleno v podkapitole č. 2.2.3 piezoelektrický měnič převádí elektrické kmity na mechanické a naopak. Funkčnost takového měniče se dá ověřit pomocí vibrometru - přístroje, měřicího mechanické kmity (vibrace). Jelikož nebyl tento přístroj k dispozici, testování se provádělo pomocí dvojice piezo-měničů. Dva měniče se daly k sobě, jak je ukázáno na obrázku č. 4.5.



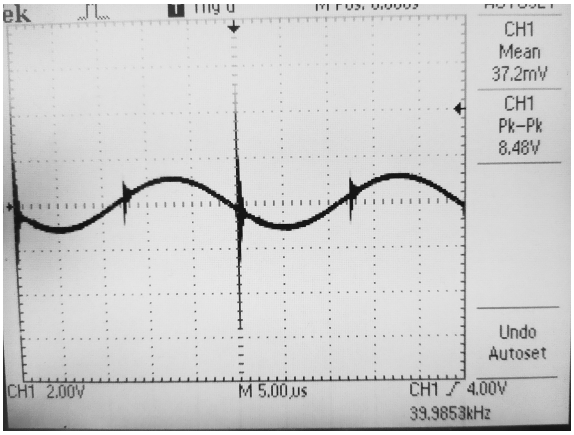
Obrázek 4.5: Experiment s piezo-měniči

Na jeden z nich se posílal elektrický signál z výstupu zesilovacího můstku, druhý byl připojen na vstup osciloskopu. Funkční piezo-měnič č. 1 by měl změnit elektrické kmitání na mechanické, které by se předalo druhému měniči. Měnič č. 2 v tomto případě by začal toto kmitání převádět zpět na elektrické. Na obrázku č. 4.6 je vidět výsledek tohoto experimentu - napětí na druhém měniči se vytváří. Při silnějším stlačení dvou měničů k sobě se napětí zvyšuje (viz obr. 4.7).



(a) (b)

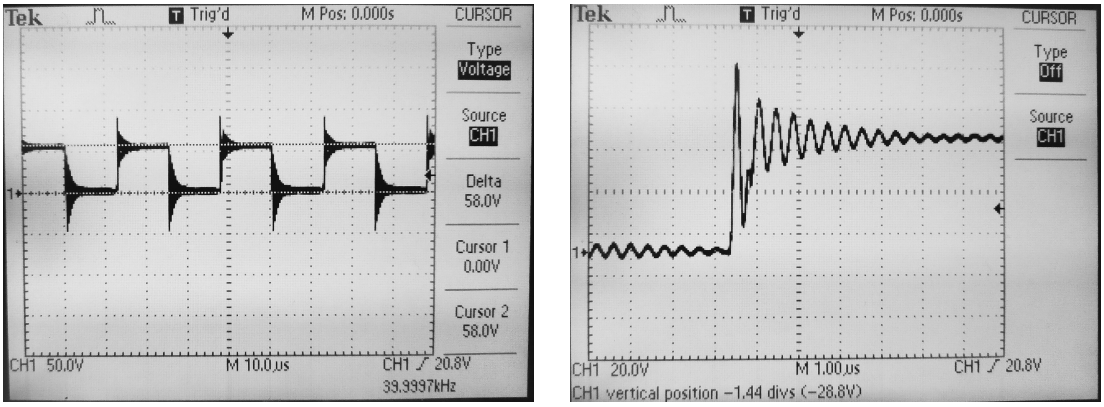
Obrázek 4.6: Průběh napětí na měniči č. 2



Obrázek 4.7: Napětí na měniči č. 2 při stlačení

Po ověření funkčnosti piezo-měniče se kontroloval jeho vliv na signál, který se na něho posílá. Na obrázku č. 4.8 je vidět, že vysokofrekvenční zákmity se zesílily. Bylo to způsobeno vlivem kapacity piezo-měniče (viz obr. 2.3).

Při testování piezoelektrického měniče na nižších frekvencích (do 19 kHz) bylo slyšet vysoké tóny.



(a) (b)

Obrázek 4.8: Průběh napětí na prvním měniči č. 1

Na frekvenci, která je považována za rezonanční (40 kHz), vznikal bzukot způsobený intenzivním mechanickým kmitáním. Podle hlasitosti bzukotu jsme byli schopní přesněji určit rezonanční frekvenci měniče. Na frekvenci 39,7 kHz byl zvuk nejhlasitější, měnič se začínal zahřívat. Když dva měniče byly v poloze, která je ukázána na obrázku č. 4.5, amplituda signálu na druhým měniče byla největší právě na tyto frekvenci. Z těchto důvodů budeme při pájení nastavovat frekvenci ultrazvuku na hodnotu kolem 39,7 kHz a případně ji regulovat.

4.4 Testování celého pájecího systému

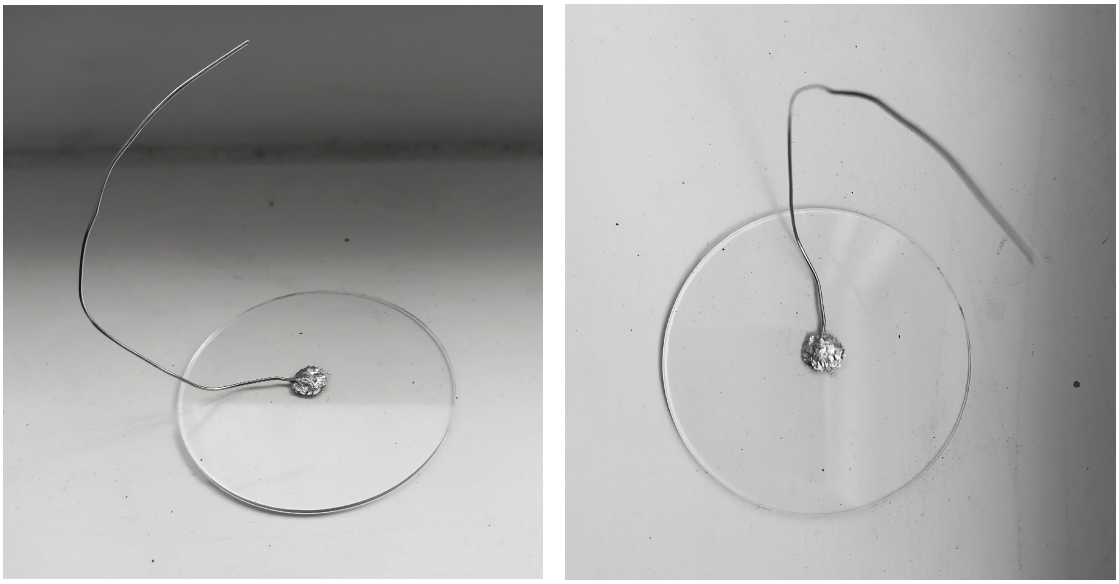
Po kontrole všech součástek a přilepení držáku a topného odporového tělíska k piezo-elementu byla otestována schopnost vyrobeného ultrazvukového systému pájet.

4.4.1 Pájecí slitina

Pro testování byla použitá pájecí slitina GS217-1000 od společnosti Senju Metal Industry Co. Ltd. (SMIC). Tato pájka neobsahuje tavidla. 95 % pájky se skládá z cínu, 4 % - z antimonu. Zbytek obsahuje zinek, křemík, měď a elementy, které se dobře chemicky váží s kyslíkem, - hliník a titan. Teplota tavení pájky je 217°C, průměr - 1 mm.

4.4.2 Výsledky

Po napájení topného tělíska na 9,9 V hrot se zahřál na cca 217°C a začala se tavit pájecí slitina. Pak pro lepší tavení slitiny napětí bylo zvýšeno na 10,3 V, což odpovídá teplotě hrotu cca 226°C. Jako pájené materiály se používaly obyčejné sklo a hliníkový drát. Frekvence ultrazvukového signálu byla nastavena na 39,7 kHz.



(a) (b)

Obrázek 4.9: Připájený na sklo hliníkový drát

Na obrázku č. 4.11 je znázorněn výsledek experimentu. Drát připájený na sklo se nepovedlo snadno odtrhnout. To znamená, že spoj vyšel pevný a spolehlivý.

Při pájení se dost silně zahříval hrot, což neznačně komplikovalo proces.

Kapitola 5

Náklady

V této kapitole budou spočítány náklady na výrobu ultrazvukové páječky a porovnány s cenou komerčních pájecích systémů. V tabulce č. 5.2 je cena každé použité součástky, potřebné pro výrobu ultrazvukové páječky. V tabulce č. 5.1 jsou ceny přístrojů a součástek, které byly použity pro testování pájecího systému.

Přístroj/Součástka	**Počet**	**Cena**
ZDROJE NAPÁJENÍ		
SPS-9600 MANSON	2	2×6 385,28 Kč
BML 351011/2	1	10 054,74 Kč
PIEZOELEKTRICKÝ MĚNIČ		
Ultrazvukový piezoelektrický vibrační měnič 40kHz/60W	1	800 Kč
PÁJECÍ SLITINA		
GS217-1000	10 g	100 Kč
OSCILOSKOP		
TDS 1002	1	7 763.29 Kč
DIGITÁLNÍ MULTIMETR		
UT20B	1	199 Kč
CELKOVÉ NÁKLADY		31 687,59 Kč

Tabulka 5.1: Náklady na testování ultrazvukové páječky

Celkové náklady na výrobu ultrazvukové páječky (vyjma nákladů na testování) vyšly na 9 443,13 Kč, což je výrazně menší než cena komerčních pájecích systémů, která převyšuje 100 000 Kč.

Přístroj/Součástka	Počet	Cena
REZISTORY		
Metalizovaný rezistor RM 430k 0207 0,6W 1%	2	2×2,90 Kč
Metalizovaný rezistor RM 3R3 0207 0,6W 1%	1	2,90 Kč
Drátový rezistor RD 0R047 4W 5%	1	19 Kč
DIODY		
Dioda MUR420	4	4×6,30 Kč
Transil Unipolární P6KE24A	1	8 Kč
Dioda BYV26C	1	9,40 Kč
KONDENZÁTORY		
Keramický kondenzátor CK 10n/500V	2	2×4,10 Kč
Fóliový kondenzátor MKS4-1M/63V	2	2×14 Kč
Fóliový kondenzátor 105	1	14 Kč
Elektrolytický kondenzátor CE 1000u/100V	2	2×47 Kč
MIKROKONTROLÉR		
Parallax Propeller Proto Board USB	1	550 Kč
ZESILOVÁCÍ PRVEK		
Poloviční můstek SA110DP	1	6560 Kč
Chladič	1	84 Kč
PIEZOELEKTRICKÝ MĚNIČ		
Ultrazvukový piezoelektrický vibrační měnič 40kHz/60W	1	800 Kč
NEPÁJIVÉ POLE		
EIC-106	1	672,36 Kč
Propojovácí vodiče	1 bal.	99 Kč
TOPNÉ TĚLÍSKO A DRŽÁK		
Odporová páječka	1	199 Kč
Structalit 3446 vysokoteplotní lepidlo pro extrémní teploty	10 g	40 Kč
UŽIVATEKSÉ ROZHRÁNÍ		
Parallax Trackball Module	1	224,27 Kč
CELKOVÉ NÁKLADY		9 443,13 Kč

Tabulka 5.2: Náklady na výrobu ultrazvukové páječky

Závěr

V této kapitole budou shrnuty závěry bakalářské práce a navrženy vylepšení pro možná budoucí zdokonalení vyrobeného pájecího systému. Cílem práce byly návrh a realizace funkčního vzorku ultrazvukové páječky a analýza nákladů potřebných k její výrobě.

Díky informacím popsaným v teoretické části práce jsme byli schopní splnit první cíl - navrhnout vzorek ultrazvukového pájecího systému. K tomu bylo potřeba zvolit vhodné součástky, které splňují požadavky na vybavení pro pájení ultrazvukem. Musely mít dobrou tepelnou vodivost, vysokou tepelnou odolnost a odolnost proti působení roztavené pájecí slitiny, aby se vyhnulo její znečištění produkty eroze a leptaní součástek touto slitinou. V kapitole Praktická část byly popsány všechny zvolené součástky:

- vývojová deska, sloužící ke generování pulzních signálů a ovládání hardwaru;
- zesilovací prvek, sloužící k zesílení vstupního signálu za účelem přenosu požadovaného množství energie do ultrazvukového převodníku;
- ultrazvukový převodník, potřebný ke generování ultrazvukového signálu;
- zdroje napájení a další potřebný hardware.

Pak bylo navrhnuto zapojení těchto součástek a byl napsán software pro jeho řízení a ovládání páječky uživatelem.

Funkčnost navrženého systému byla ověřena v Experimentální části bakalářské práce. Každá část zapojení se kontrolovala zvlášť. Problémem, který se objevil, byly vysokofrekvenční zákmity na výstupu zesilovacího prvku. Tyto zákmity byly způsobeny tím, že k propojování součástek jsme využívali nepájivé kontaktní pole. Delší propojky mezi součástkami vytvářely parazitní indukčnosti a kapacity, což mělo velký vliv na průběh napětí. Po přípojení piezoelektrického měniče se zákmity zesílily kvůli působení jeho vlastní kapacity. Po kontrole funkčnosti každé součástky byl otestován celý pájecí systém. Hrot páječky jsme zahřáli na teplotu cca 226°C, což je o trochu vyšší než teplota tavení pájecí slitiny. Jako pájené materiály jsme zvolili sklo a hliníkový drát, frekvenci ultrazvuku nastavili ručně na 39,7 kHz. Po připájení materiálů k sobě nebylo možné je snadno rozdělit. Proto považujeme spoj za spolehlivý a druhý cíl bakalářské práce za splněný. Nedostatkem je silné zahřívání držáku.

V páté kapitole byly spočítány náklady na výrobu výsledného pájecího systému:

celkem 9 443,13 Kč. Tato cena je výrazně menší než cena komerčních ultrazvukových pájecích stanic. Mohli bychom ušetřit velkou sumu za zesilovací prvek, kdybychom ho sestavili z diskrétních součástek.

Na závěr bych navrhla několik vylepšení do budoucna pro zdokonalení výsledné ultrazvukové páječky:

- výměna nepájivého pole za plošný spoj - pro minimalizaci vlivů parazitních indukčností a kapacit propojovácích vodičů;
- přidání zpětné vazby z piezo-měniče pro automatické nastavení jeho rezonanční frekvence;
- přidání do zapojení displeje pro sledování frekvence;
- použití teplo-vzdorného nezahřívajícího se plastu jako materiál pro držák;
- indukční ohřev hrotu místo odporového ohřevu.

Literatura

[1] MANKO, Howard. Pajka i pripoji (Solders and soldering). Překlad z angličtiny: Ing. M. B. TAPELZON [online]. MAŠINOSTROJENIJE. Moskva, 1968. [cit. 2020-15-05] Dostupné z: http://booktech.ru/books/payka/194-payka-i-pripoi-1968-g-manko.html

[2] Power amplifier classes. Wikipedia, the free encyclopedia [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation. (2001) [cit. 2020-15-05] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_amplifier_classes

[3] ENSMINGER, Dale, J. BOND, Leonard. Ultrasonics: Fundamentals, Technologies and Applications [online]. Third Edition. CRC Press. (2011) Dostupné z: http://docshare01.docshare.tips/files/13276/132766567.pdf

[4] SURKOV, Oleg. Klassy usilitělej moščnosti. Usilitěli klassov A, B, AB, C. Molodoj učenyj (2017) №17 [online]. [cit. 2020-15-05]. Dostupné z: https://moluch.ru/archive/151/42852/

[5] ŠUDÁK, Karel. Rozdělení zesilovačů dle třídy (A, AB, D, G, H). Blog Ahifi (2019) [online]. [cit. 2020-15-05] Dostupné z: https://www.ahifi.cz/clanky/detail/rozdeleni-zesilovacu-dle-tridy-a-ab-d-g-h.htm

[6] Amplifier Classes. Electronics tutorials [online]. [cit. 2020-15-05] Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html

[7] WANG, Xusheng. Ultrasonic Generator for Surgical Applications and Non-invasive Cancer Treatment by High IntensityFocused Ultrasound. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Paříž-Saclay. Fakulta nano- a mikrotechnologií. (2016)

[8] BULLETIN ANOTACÍ. Stránka 41: DUŠEK Karel, STARÝ Jiří. ASPEKTY ULTRAZVUKOVÉHO PÁJENÍ . STM-info konsorcium. Brno, 2014. ISSN 1211-6947. Dostupné z: http://www.smtinfo.cz/download/bulletiny/SMT_bulletin1410.pdf

[9] CASANOVAS, Ferran. Design and construction of a prototypeof an ultrasonic applicator for ultrasonic soldering, cutting and drilling. Diplomová práce (Ing.). České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Technická škola telekomunikačního inženýrství v Barceloně, Polytechnická univerzita v Katalánsku. (2019)

[10] ABEL, Martin. Robotické pájec. DPS (2018) [online]. [cit. 2020-20-03] Dostupné z: https://www.dps-az.cz/vyroba/id:54681

[11] LANIN, Vladimir. Uľtrazvkovaja pajka i luženije v eľektronikě. Těchnologii v eľektronnoj promyšlěnnosti (2009) [online] [cit. 2020-20-03]. Moskva. Dostupné z: https://www.tech-e.ru/2009_7_24.php

[12] TSIFAKIS, Dimitrios. VK1SV class-E design class for beginners. VK1SV [online]. [cit. 2020-16-05]. Dostupné z: https://people.physics.anu.edu.au/ dxt103/class-e/

[13] MRZENA, Roman. Budící obvody pro SiC tranzistory s nadproudovou ochranou. Diplomová práce (Ing.). České Vysoké Učení Technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky. (2019)

[14] Fully Integrated Half-Bridge Module. Apex Microtechnology (2020) [online]. [cit. 2020-15-06]. Dostupné z: https://www.apexanalog.com/resources/products/sa110u.pdf

[15] Propeller™ P8X32A Datasheet. Parallax (2011) [online]. [cit. 2020-10-07]. Dostupné z: https://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/P8X32A-Propeller-Datasheet-v1.4.0_0.pdf

[16] Propeller Proto Board (#32212), Propeller Proto Board USB (#32812), Proto Board Accessory Kit (#130-32212). Parallax [online]. [cit. 2020-10-07]. Dostupné z: https://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/32212-Propeller-ProtoBoard-Documentation-v1.3.pdf

[17] Trackball Module (#27908). Parallax [online]. [cit. 2020-10-07]. Dostupné z: https://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/27908-Trackball-Module-Documentation-v1.0.pdf

[18] TECHNICAL DATASHEET Structalit 3446. Ulbrich (2010) [online]. [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: https://www.ulbrich.cz/chemical-technical-products/TDS_STRUCTALIT_3446_Extreme_temperature_adhesive.pdf

[19] S00/9602, High Current Switching Mode Power Supply with Remote Sensing & Control, User Manual. Manson [online]. [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: https://www.manson.com.hk/wp-content/uploads/2018/08/7673-9602-0002.pdf

[20] Ultrasonic soldering iron Sunbonder. KURODA TECHNO CO.,Ltd. [online]. [cit. 2020-5-08] Dostupné z https://www.kuroda-techno.com/english/product/usm-560.html

[21] Uľtrazvukovaja pajaľnaja systěma MBR ELECTRONICS sěrii USS-9210 / 9510. SmtMaks [online]. [cit. 2020-8-05]. Dostupné z: http://smt-max.net/product/tehnologoborud/ultrazvukovaya-payalnaya-sistema-mbr-electronics-serii-uss-9210-9510/

[22] Pajka. Wikipedia, the free encyclopedia [online].
San Francisco: Wikimedia Foundation [online]. [cit. 2020-8-05]. Dostupné z: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D0%B9%D0%BA%D0%B0

[23] Fľus (pajka). Wikipedia, the free encyclopedia [online].
San Francisco: Wikimedia Foundation [online]. [cit. 2020-8-05]. Dostupné z: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BB%D1%8E%D1%81_(%D0%BF%D0%B0%

[24] Pripoj. Wikipedia, the free encyclopedia [online].
San Francisco: Wikimedia Foundation [online]. [cit. 2020-8-05]. Dostupné z: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BF%D0%BE%D0%B9

[25] LEVKIN, Dmitrii. Uľltrazvuk. Osnovy těorii rasprostraněnija uľtrazvukovych voln. Inženěrnyje rešenija [online]. [cit. 2020-8-05]. Dostupné z: https://engineering-solutions.ru/ultrasound/theory/

[26] Determining Resonance Frequency. APC Internetional, Ltd. [online]. [cit. 2020-8-05]. Dostupné z: https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/determining-resonance-frequency.html

[27] Piezoelectric Transducers Schematic [online]. [cit. 2020-8-05]. Dostupné z: https://books-online.club/sl-SNSZH-D7256/signup-spry/#/z=ER5bJ4C68O60ijZWiFuUU4/theme=default/q=Piezoelectric+Transducers+Sc
5671-686a-9b9b-22f7a351d966/project=u82yg1/mh_offer_id=/dp=vbmerPz5XmpiXbh7TtI

[28] Evaluation Kit. APEX Microtechnology (2019) [online]. [cit. 2020-8-06]. Dostupné z: https://www.apexanalog.com/resources/products/ek43u.pdf

[29] ADACHI, Kazunari, TSUJ, Masaharu, KATO, Hiroshi. Elastic contact problem of the piezoelectric material in the structure of a bolt-clamped Langevin-type transducer. The Journal of the Acoustical Society of America 105, 1651 (1999) [online]. [cit. 2020-8-06] Dostupné z: https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.426704?journalCode=jas

Seznam obrázků

1 Pájecí stanice od společností Kuroda Techno Co., Ltd. (a) a MBR Electronics GmbH (b) [20, 21] 9

1.1 Proces ultrazvukového pájení [10] 13

2.1 Últrazvuková páječka: 1 - UZ převodník; 2 - hrot; 3 - pájený materiál; 4 - pájka; 5 - topný element [11] 15

2.2 Piezo-měnice 17

2.3 Ekvivalentní elektrické zapojení piezo-měniče [27] 17

2.4 Závislost impedance na frekvenci [26] 18

2.5 Porovnání výkonových zesilovačů [6] 18

2.6 Schéma zapojení zesilovače třídy A [6] 19

2.7 Schéma zapojení zesilovače třídy B [6] 19

2.8 Zapojení zesilovače třídy AB [6] 20

2.9 Schéma zapojení zesilovače třídy C [6] 20

2.10 Blokový diagram spínacího zesilovače třídy D [2] 21

2.11 Schéma zapojení zesilovače třídy E [12] 21

3.1 P8X32A-Q44 Propeller čip [15] 23

3.2 Propeller Proto Board USB [16] 24

3.3 Blokový diagram SA110 [14] 25

3.4 Zapojení SA110 [28] 26

3.5 SA110 přišroubovány ke chladiči 26

3.6 Graf vstupů a výstupů 27

3.7 Piezo-měnič 28

3.8 Zapojení můstku s piezo-měničem [28] 28

3.9 Teploměr 29

3.10 Mechanická část ultrazvukové páječky 29
3.11 Zdroj napětí SPS-9600 30
3.12 Zdroj napětí BML 351011/2 30
3.13 Sériový terminál Parallax - žádost o zvolení modu 31
3.14 Sériový terminál Parallax - mode č. 0 32
3.15 Sériový terminál Parallax - mode č. 1 32
3.16 Trackball modul [17] 33

4.1 Osciloskop TDS1002 35
4.2 Signály na pinech P14, P13 (a) a P15 (b) 36
4.3 Průběhy signálů na výstupu SA110DP (kanál 1) a na P14 (kanál 2) . 36
4.4 Signál na výstupu SA110DP 37
4.5 Experiment s piezo-měniči 37
4.6 Průběh napětí na měniči č. 2 38
4.7 Napětí na měniči č. 2 při stlačení 38
4.8 Průběh napětí na prvním měniči č. 1 39
4.9 Připájený na sklo hliníkový drát 40

Seznam tabulek

3.1 Součástky pro zapojení zesilovácího prvku 25

3.2 Logická tabulka vstupů a výstupů, kde L - nízká úroveň, H - vysoká úroveň, X - žádný signál 27

5.1 Náklady na testování ultrazvukové páječky 41

5.2 Náklady na výrobu ultrazvukové páječky 42

Seznam příloh

- frequency_control.spin
- Synth.spin
- Trackball.spin