



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VÝROBA A IMPLEMENTACE ULTRAZVUKOVÉHO SENZORU PRO VÝUKOVOU PLATFORMU

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ULTRASONIC SENSOR FOR THE EDUCATIONAL PLATFORM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Slabý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Spáčil

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Vojtěch Slabý
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Spáčil
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba a implementace ultrazvukového senzoru pro výukovou platformu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tématem práce je výroba a implementace nového senzoru, který bude využit při výuce na VUT FSI. V předchozích letech byla vyvinuta nová inovativní výuková platforma, která zmodernizovala a usnadnila výuku jak studentům, tak i vyučujícím. Hlavní výpočetní jednotka byla již realizována v rámci fondu vědy v předchozích letech. Náplní práce studenta je rozšíření této stavebnice o nový ultrazvukový senzor.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Proveďte rešerši dostupných ultrazvukových senzorů a analyzujte jejich možná zapojení.
- 2) Zprovozněte vlastní DPS a realizujte měření za použití 2 ultrazvukových transducerů, kde použijete jeden jako přijímač a druhý jako vysílač.
- 3) Zprovozněte vlastní DPS pro ultrazvukový senzor, kde za pomoci jednoho transduceru dokážete změřit vzdálenost objektů před senzorem.
- 4) Na finální DPS dle předem daných požadavků na velikost integrujte mikrokontrolér a měřenou vzdálenost odesílejte zprávami po sběrnici SPI.

Seznam doporučené literatury:

VALÁŠEK, Michael. Mechatronika. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01276-X.

ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.

SKALICKÝ, Jiří. Teorie řízení 1. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2112-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na návrh, výrobu a využití ultrazvukového modulu pro měření vzdálenosti k výukové jednotce Jobst. Modul má sloužit jako originální sensor vzdálenosti pro vývojovou jednotku a nahradit komerční modul HC-SR04, který nevyhovuje rozměrům pouzdra pro sensory. Bakalářská práce se věnuje principu ultrazvukového měření vzdálenosti a výpočtem vzdálenostních hodnot.

V textu bakalářské práce je obsažen přehled aktuálně dostupných sensorů na trhu a jejich porovnání s naší variantou řešení. Práce dále obsahuje popis dvou základních metod pro řízení ultrazvukových transducerů. Požadavky ultrazvukového sensoru, které jsou důležité při návrhu sensoru, jsou zváženy při návrhu prototypu sensoru. Bakalářská práce obsahuje návrh potřebných obvodů DPS, jejímž středem je mikrokontrolér PIC16F1769. Na programování mikrokontroléru PIC využít PicKit 3 a vývojové prostředí MPLab X IDE, které umožňuje přímou komunikaci s mikrokontrolérem. Pro firmware je užít jazyk „C“. Pro komunikaci s vývojovou platformou slouží SPI.

Výsledkem je popis návrhu monostatického ultrazvukového sensoru vzdálenosti. Podrobení prototypů zkušebnímu měření a analýza zvolených obvodů, ve vztahu k zamýšlenému použití sensoru.

Summary

Bachelor's thesis is focused on a design, fabrication and implementation of an ultrasonic sensor module, which will serve for a distance measurement for an education developer shield based. This sensor should be used as an original module which fits in a requested size format. Now is used a sensor HC-SR04 which exceeds size and voltage needed for a module and uses an adapter, which is not rigid. Bachelor's thesis is focused on a topic of a existing ultrasound principles and its function for ultrasound distance measurement and calculating necessary values.

Thesis includes a list of existing solution for designing a monostatic or a bistatic transducers sensors. Our module is compared to those solutions and there is also an overview on a two most used methods for a circuit design which controls a transducer. You can find a designed circuits for creating a prototype PCBs, which heart is a microcontroller PIC16F1769. Programming is handled by a PicKit 3, MPLab X IDE in „C“ language. Communication with a Jobst shield is handled by SPI. Result of this thesis is a design, fabrication and use of two prototype PCBs. First PCB is not tied by a size request and serves for a basic circuit testing and basic distance measurement and the second PCB is in a desired size and serves for distance measurement testing and communication via SPI. These prototypes were fabricated and tested in a way to fulfill set task goals.

Klíčová slova

Ultrazvuk, ultrazvukový sensor, měření vzdálenosti, návrh sensoru, piezoelektrický sensor, C, budící obvod, PIC

Keywords

Ultrasound, Ultrasonic sensor, Distance Measurement, Sensor Design, Piezoelectric Sensor, C, burst circuit, PIC

Bibliografická citace

SLABÝ, V. *Výroba a implementace ultrazvukového senzoru pro výukovou platformu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2020. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Spáčil.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana
Ing. Tomáše Spáčila. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Vojtěch Slabý

V Brně

.

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Tomáši Spáčilovi, za odbornou pomoc při návrhu a funkčním směřování modulu, za užitečné rady a připomínky v průběhu vzniku práce. Dále děkuji za zapůjčení a objednání jednotlivých zařízení pro testování obvodu, jako je osciloskop a vlastní DPS, které jsem použil pro řešení této své práce. Zároveň bych rád poděkoval týmu vyučujících v mechatronické laboratoři, kteří mi byli nápomocni při vzniklých problémech a při pochybách. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu a trpělivost a také za pomoc při závěrečné textové korekci.

Vojtěch Slabý

Obsah

1	Úvod	9
2	Rešerše	10
2.1	Ultrazvukový princip a šíření vln ve vzduchu	10
2.1.1	Ultrazvuk ve zvukovém spektru	10
2.1.2	Akustická intenzita, tlak a rychlost šíření zvuku	10
2.1.3	Akustické tlumení	11
2.1.4	Akustická impedance	12
2.1.5	Piezoelektrický efekt	13
2.1.6	Ultrazvukové transducery	14
2.1.7	Princip vysílání a přijímání signálu	16
2.2	Dostupná provedení ultrazvukových senzorů	19
2.2.1	Ultrazvukové sensory dostupné na trhu	19
2.2.2	Zařazení našeho řešení do řady existující zařízení	22
2.2.3	Transformátorová a přímá metoda ovládání transduceru.	23
2.3	Řídící jednotky pro Transducery	26
2.4	Mikrokontrolér PIC16F1769	27
2.4.1	SPI - Sériové periferní rozhraní	27
3	Cíle řešení	28
3.0.1	Dostupné metody pro buzení signálu prvního a druhého cíle	29
3.1	Cíl druhý	29
3.2	Cíl třetí	29
3.3	Cíl čtvrtý	29
4	Postup řešení a výsledky	30
4.0.1	Budící obvod	30
4.0.2	SPICE simulace RLC budícího obvodu	30
4.0.3	SPICE simulace oddělovacího a zesilovacího obvodu	32
4.0.4	Obvod a DPS pro 2. a 3. cíl	33
4.0.5	Firmware pro měření vzdálenosti cíle 2 a 3	35
4.0.6	Obvod a DPS pro 3. cíl	36
4.0.7	Testování měniče zvyšujícího napětí	38
4.1	Cíl druhý	40
4.1.1	Měření vzdálenosti	40
4.1.2	Tabulka naměřených hodnot	42
4.2	Cíl třetí	43
4.2.1	Měření vzdálenosti	43
4.2.2	Tabulka naměřených hodnot	45
4.3	Cíl čtvrtý	46
4.3.1	Bloková reprezentace modulu pro 4. cíl	46

4.3.2	Testování a měření modulu	47
5	Závěr	50
	Seznam obrázků	54
	Literatura	57

1 Úvod

Návrh a implementace ultrazvukového sensoru pro využití s výukovou jednotkou „Jobst“ pro studenty Strojní fakulty obor Mechatronika je problematika, ve které je potřeba zvážit podmínky a nároky pro daný sensor.

Výukový modul má být používán při výuce a měl by ideálně plně nahradit momentálně používanou a omezující platformu LEGO MINDSTORMS. Platforma již používá několik sensorů¹ a byly s nimi presentovány různé projekty². Aktuální varianta jednotky je přestavěna na napájecí napětí sensorů 3,3 V a enkodérů. Proto není vhodné využití sensorů jako je ultrazvukový sensor vzdálenosti HCSR04 a původní sensor stavebnice LEGO MINDSTORMS, který vyžaduje 5 V. Nové řešení ultrazvukového sensoru si klade za důležité konstrukci sensoru vlastního návrhu s ohledem na kritéria uvedená v kapitole 2 na straně 22.

DPS je omezena místem a dodávaným napětím sensoru. Jelikož pro snímání vzdálenosti je potřeba vytvořit dostatečné napětí, aby byla tlaková vlna dostatečně silná a vhodná pro snímání. Modul má sloužit jako samostatný funkční sensor, který lze využít jako vysílač, přijímač nebo jejich kombinace. Také kontrolér má být schopen odesílat zpracovaná data po sběrnici SPI. Tato práce ve svém textu shrnuje podmínky pro vznik a úskalí při realizaci zvoleného návrhu odpovídajícího sensoru a zkoumá jeho proveditelnost. Dále zkoumá různé varianty a stabilitu navržených obvodů DPS, ze kterých vyplyne, jejich spolehlivost.

¹Jako je RGB sensor, gyroskop a akcelerometr.

²Na stránkách výukové platformy Jobst je presentováno několik projektů s popisem a videme, která znázorňují výukovou platformu. Je zde třeba zvedací mechanismus, laserový gravírovací stroj a další.

2 Rešerše

Kapitola se zabývá ultrazvukovým spektrem, piezoelektrickým efektem, principem ultrazvukového přenosu, ultrazvukovými sensory. Řešení jsou rozebrána a uvedena v kontextu požadavků navrhovaného sensoru pro výukovou platformu v závislosti na požadavky zařízení v kapitole 2.2.2 na straně 22. Mimo jiné jsou rozebrány některé ultrazvukové sensory dostupné na trhu v kapitole 2.2 na straně 19. Dále je v kapitole popsán mikrokontrolér PIC16F1769 a použitelné periférie, které jsou pro ovládání sensoru důležité.

2.1 Ultrazvukový princip a šíření vln ve vzduchu

Zvukové vlny jsou oproti elektromagnetickým vlnám odkázány na elasticitu prostředí. Elektromagnetické vlny se mohou šířit jak ve vakuu, tak v elastickém prostředí. V podélném vlnění se částice pohybuje ve směru šíření vlny, kdežto příčné vlnění je kolmé na směr šíření.

2.1.1 Ultrazvuk ve zvukovém spektru

Ultrazvuk se řadí ve zvukovém spektru mezi zvuk s frekvencí vyšší jak $16kHz$ a nižší jak $1GHz$. Tyto hodnoty jsou již pro člověka neslyšitelné, jelikož naráží na anatomicko-fyzikální limity středního a vnitřního ucha. Vyjímkou jsou děti, u nichž je hranice slyšitelnosti mírně větší $20kHz$ [6].

Přehled akustických pásem		
Typ zvuku	$f_{min}[Hz]$	$f_{max}[Hz]$
Infrazvuk	0	20
Zvuk	20	$20 \cdot 10^3$
Ultrazvuk	$20 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^9$

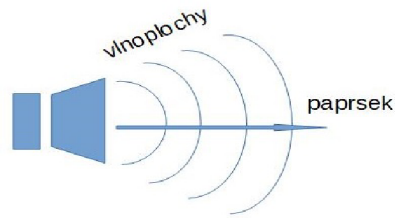
Tabulka 2.1: Akustická spektra [9]

Zvukové vlny jsou vlny mechanické. Mezi mechanické vlny patří vlny zvukové, seismické a vlny na vodní hladině. Tyto vlny se řídí Newtonovy zákony a mohou existovat pouze v určitém látkovém prostředí (voda, vzduch, hornina) [2].

Vlny se šíří od zdroje všemi směry. Vlnoplochy jsou kulového charakteru v blízkosti zdroje. Dál od zdroje je lze aproximovat rovinami se středem ve zdroji. Paprsky jsou kolmé na vlnoplochy a označují směr šíření vlnoploch (obrázek 2.2) [2].

2.1.2 Akustická intenzita, tlak a rychlost šíření zvuku

Jakýkoliv kousek vibrující látky může přenášet akustickou energii. Míra energie vibrací se nazývá akustický výkon (P_a [W]). Akustická intenzita je míra velikosti přenosu energie jednotkovou plochou a má jednotku $[\frac{W}{m^2}]$. Akustická vlna se charakterizuje dvěma parametry: tlakem zvuku (skalár, který se mění v závislosti na prostředí) a rychlostí částice (vektor). Intenzita je



Obrázek 2.1: Vlnoplocha a paprsek [22].

pak střední hodnotou součinu těchto parametrů. Rovnice intenzity ve volném prostoru je dána vztahem:

$$I = \frac{p^2}{\rho a} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (2.1)$$

kde p je střední hodnota tlaku, ρ je hustota prostředí a a je rychlost zvuku. Rovnice platí jen ve volném prostoru. Často¹ vyjadřujeme výkon, tlak a intenzitu v dB, což je relativní hodnota k referenční hodnotě. Většinou se užívají tyto hodnoty: $P_{ref} = 1pW$, $I_{ref} = 1pW/m^2$ a p_{ref} (zvukový práh) = $20\mu Pa$ [8].

Obecně je rychlost šíření zvuku v prostředí dána rovnicí:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \left[\frac{m}{s} \right], \quad (2.2)$$

kde K je modul objemové pružnosti a ρ je hustota prostředí [8].

2.1.3 Akustické tlumení

Tlumení zvukové vlny je dáno molekulárním pohlcením akustické energie a rozptylem, vlna se postupně prostupem prostředí oslabuje a ztrácí energii. Pro podélné vlnění platí Beersův zákon:

$$P_o = P_a e^{-\alpha \Delta x} [W], \quad (2.3)$$

kde P_a je akustický výkon v určitém bodě x v prostoru, P_o je výkon o Δx vzdálenost ve směru šíření vlny. Tlumicí koeficient α zahrnuje dva jevy a to pohlcovací a rozptylové ztráty [8].

¹Dále se můžeme setkat s jednotkami výkonu [W], [$J \cdot s^{-1}$], [$Nm \cdot s^{-1}$]; tlaku [Pa], [$N \cdot m^{-2}$], [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$] a intenzity [$V \cdot m^{-1}$], [$N \cdot C^{-1}$]

2.1.4 Akustická impedance

Akustická impedance je určena (sinusovou) vlnou zvukového tlaku p a rychlostí částice u vlny. Jelikož se zvukové vlny šíří jenom jedním směrem, pak je impedance Z :

$$Z = \frac{p}{u} = \sqrt{\rho \cdot c} = a \cdot \rho \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right], \quad (2.4)$$

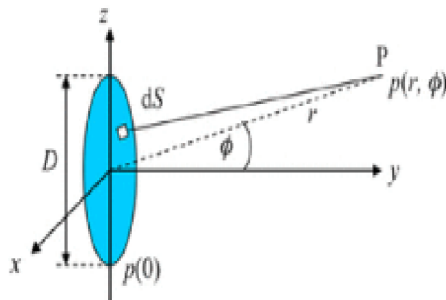
pak platí, že různé materiály o různých hustotách vykazují různou míru impedance prostředí.

Impedance je velmi důležitý prvek pro přenos akustické energie prostředím a mezi dvěma různými látkami. Podobný efekt lze spatřit u světelných vln, které se odrážejí a lámou na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi. Akustické vlny se dokáží také odrážet na rozhraní dvou prostředí s různými zvukovými vlastnostmi. Jakmile zvuková vlna narazí na rozhraní dvou prostředí, část akustické energie, ochuzené o energii při přenosu prvním prostředím, se odrazí zpět. Část akustické energie je pohlcena tímto okolím, která je na hranici s původním prostředím a tímto prostředím se dále šíří. Pro určení množství odražené nebo pohlcené energie se dá vyjádřit akustickými impedancemi. Zvukové vlny se řídí Snellovým zákonem, kterým se vypočte směr a amplituda rozdělené vlny. Ve speciálním případě, kdy se vlna odrazí kolmo k rovině hranice prostředí, platí poměr mezi odraženou energií a jinými energiemi (poměr odrazu) je dán:

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 [\Omega], \quad (2.5)$$

kde Z_1 je akustická impedance prostředí počáteční vlny a Z_2 je impedance prostředí za rozhraním dvou látek. Pokud mají obě látky stejné impedance, pak se odraz neuskuteční a vlna prostoupí dál. Pokud však je impedance velmi rozdílná, vlna se naopak šíří prostředím hůře.

To má vliv na měření vzdálenosti typu "*Time of Flight*", kde vysílač a přijímač zvukového signálu jsou namířeny stejným směrem. V prvním případě se zvuková vlna odrazí přímo zpět, stejně jako světlo a zrcadlo. Nerovnoměrné povrchy odrazí většinu vln od zdroje šíření vln, a zpět se na přijímač dostane jen slabý signál. Zároveň platí, že přenos mezi akusticky "*měkkým*" a "*tvrdým*" prostředím je velmi slabý. Většina akustických sensorů pocítí tento efekt dvakrát, jelikož přechod mezi prostředím nastane dvakrát, a to při odrazu a při kontaktu s povrchem přijímače. Velký vliv na poměr impedancí má i velká vzduchová mezera [8].

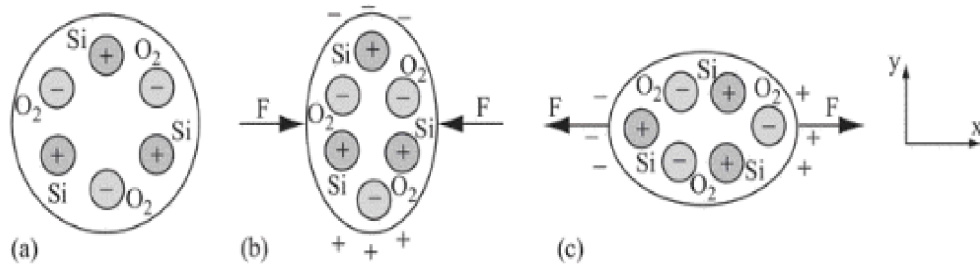


Obrázek 2.2: Výpočet akustického pole a pístového emiteru [8].

2.1.5 Piezoelektrický efekt

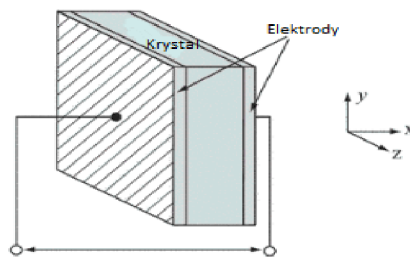
Piezoelektrický efekt je efekt, kdy vytvořením mechanického napětí dojde ke vzniku elektrického náboje v krystalických materiálech. Opačný efekt nastane, když působením elektrického náboje na mřížku, dojde k mechanické deformaci v materiálu, [5].

Piezoelektrický efekt vzniká přirozeně v materiálech jako je křemen (oxid křemičitý) a používá se už několik desetiletí v krystalických oscilátorech². Zároveň tento efekt vykazují i různé druhy keramiky a polymerů. Tento efekt lze pochopit z obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Piezoelektrický princip křemíku. (a) Nezatížený. (b) Zatížený dovnitř. (c) Zatížený naopak [5].

Velká většina piezoelektrických zařízení se vyrábí ve formě jednoduchého kondenzátoru. Jak zobrazuje obrázek 2.4, piezoelektrické sensory jsou většinou vyrobené z piezokeramických materiálů, jako je například oxid zirkoničitanu-titaničitého (PZT) a polymerových povlaků, jako je třeba polyvinyliden fluorid (PVDF).

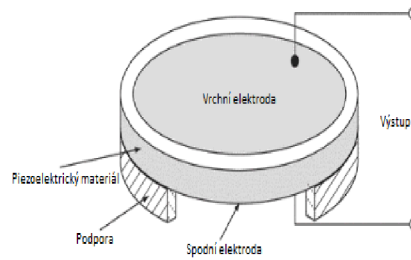


Obrázek 2.4: Základní stavba piezoelektrického zařízení [5].

Nejčastějším piezoelektrickým senzorem je piezoelektrický mikrofon, což je zařízení používané pro akustické a ultrazvukové aplikace. Po aplikaci určité síly na mikrofon, může sloužit jako vysílač, tak i přijímač signálu. Pomocí struktury mikrofonu a změně tlaku Δp , nastane změna elektrického napětí ΔV , to ukazuje následující vztah.

$$\Delta V = \frac{d_{ij}(\Delta p A)d}{\epsilon_{ij}A} = \frac{d_{ij}d}{e_{ij}}\Delta p \text{ [V]}. \quad (2.6)$$

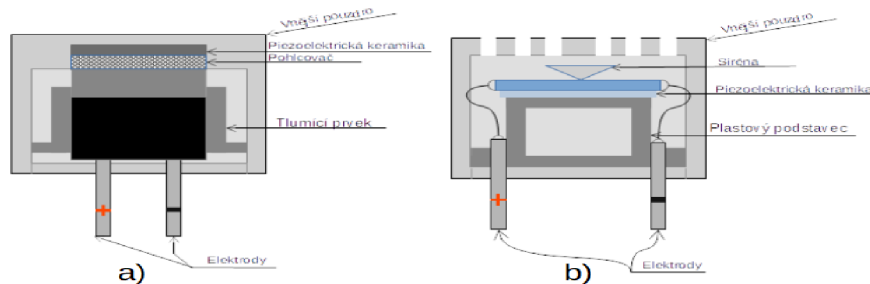
²jak je uvedeno v učebním textu [1]



Obrázek 2.5: Základní piezoelektrická struktura [5].

Jde o lineární vztah pro snímání akustického tlaku. Běžná struktura senzoru je na obrázku 2.5. Jedna z výrazných vlastností těchto zařízení je, že dokáží fungovat na vysokých frekvencích, proto se používají jako zařízení pro ultrazvukové aplikace.

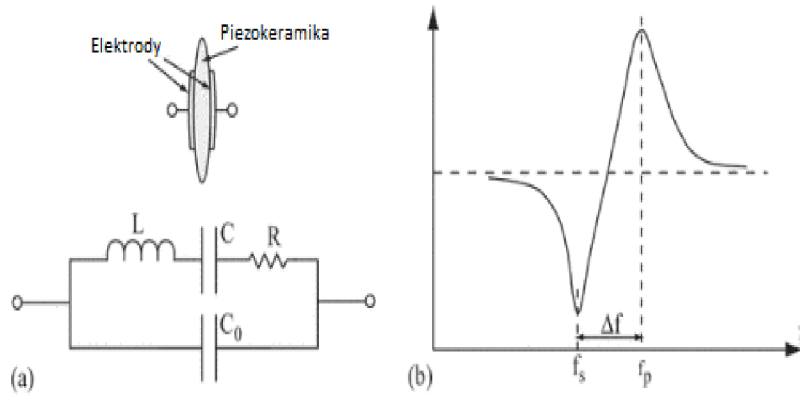
2.1.6 Ultrazvukové transducery



Obrázek 2.6: Pouzdro piezoelektrického senzoru a) s uzavřeným pouzdrém a b) s otevřeným pouzdrém [5].

Piezoelektrické transducery sdílejí s výše popsaným funkční principy, ale mají velmi rozdílné konstrukční řešení a výběr materiálu. Také mají jiný rozsah frekvencí, neboť se jejich pracovní frekvence běžně pohybuje mimo slyšitelné pásmo. Frekvence akustických senzorů končí tam, kde začíná frekvence ultrazvukových zařízení a jejich pracovní oblast se překrývá. Ultrazvukové transducery jsou konstruovány velmi podobně, jako jsou piezoelektrické akustické transducery, jelikož se jejich použití střetává na hranici akustického a ultrazvukového pásma. To vede k tomu, že se piezoelektrické senzory konstruují ve stejném provedení a dají se použít na více frekvencích. Jsou tedy vhodné pro přijímání i vysílání signálů na vícero frekvencích. Konstrukčně jsou zařízení postavena na principu konstrukce vyobrazené na obrázku 2.5. Tato zařízení jsou nejčastěji postavena na pracovních frekvencích 25kHz a 40kHz. Jejich nejčastější použití najdeme v automobilovém průmyslu, v robotickém průmyslu a obecně v zařízeních určených pro vyhýbání se předmětům, měření vzdálenosti a bezpečnostních systémech. Velkým problémem těchto zařízení je silné tlumení ultrazvuku při šíření ve vzduchu, proto je jejich dosah omezen a záleží na velikosti buzení signálu (V_{pp} - peak to peak napětí). Zároveň je ho výhodné používat pro jeho jednoduchost a pokrytí velké plochy. Proto, aby byl pochopen princip a fungování piezoelektrických transducerů, je dobré se podívat na náhradní schéma a kmitočtovou charakteristiku, na obrázku 2.7.

Pro pochopení rezonanční charakteristiky zařízení poslouží náhradní schéma, které má dvě rezonanční frekvence paralelní a sériovou (nazývanou též antirezonanční) z obrázku 2.7b.



Obrázek 2.7: a) Náhradní schéma piezoelektrického rezonátoru. b) Kmitočtová charakteristika [5].

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \text{ (frekvence v sérii)} \quad (2.7)$$

a

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC[C_o/(C + C_o)]}} \text{ [Hz]} \text{ (frekvence paralelně)}. \quad (2.8)$$

Ve většině aplikací je výhodná jen jedna rezonanční frekvence a proto se materiál navrhne tak, aby byly tyto frekvence co nejdále od sebe. Pro určování těchto frekvencí se stanovuje poměr kapacit:

$$m = \frac{C}{C_o}. \quad (2.9)$$

Díky tomu lze určit vztah mezi těmito frekvencemi:

$$f_p = f_s(1 + m) \text{ [Hz]}. \quad (2.10)$$

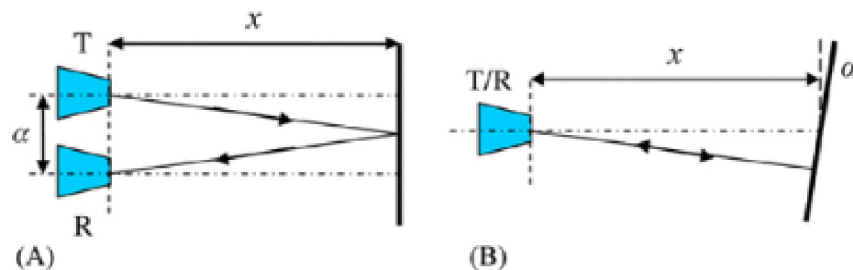
Což znamená, že čím větší poměr frekvencí m tím větší je rozestup rezonancí. Odpor R v náhradním schématu sice nevystupuje ve vzorcích pro určování rezonance, ale slouží jako tlumicí (ztrátový) prvek. Pro to slouží takzvaný činitel jakosti Q piezo elektrického zařízení. To určíme pomocí:

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ [C]}. \quad (2.11)$$

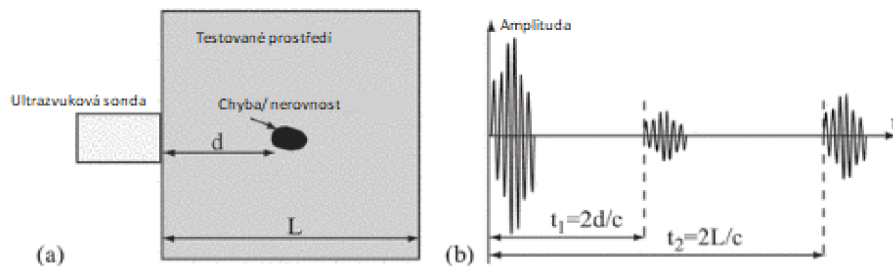
„ Q “ faktor zároveň určuje poměr mezi uchovanou a spotřebovanou energií [5].

2.1.7 Princip vysílání a přijímání signálu

Všechny ultrazvukové sensory jsou schopny přijímat a vysílat signál. V mnoha aplikacích se využívá sensorů tak, že jeden je užit jako přijímač a druhý sensor jako vysílač. Názorně vyobrazené metody snímání jsou na obrázku 2.8. V jiných aplikacích jako jsou sensory vzdálenosti u aut, medicínských aplikací a testování materiálů. Pro využití jednoho sensoru se využívá způsobu vyslání několika pulsů senorem a pak přepnutí do poslouchacího módu, kde se snímají odražené vlny. Vlny se zesílí a zaznamenají. Metoda ultrazvukového měření vzdálenosti je založena na principu: jakákoliv nerovnost a překážka ve směru šíření vlny způsobí ozvěnu, kterou sensor zaznamená. A to slouží k identifikaci polohy objektu. Vzdálenost od tohoto objektu je určena z doby letu vlny. Doba letu vlny od sensoru k sensoru se označuje „*Time of flight*“. Na obrázku 2.9 lze vidět znázornění buzení signálu a ozvěny odražené od překážky, případně od hranice zkoumaného materiálu [5].



Obrázek 2.8: a) Přijímač a vysílač. b) Transducer [8].



Obrázek 2.9: a) Typická měřicí sestava. b) Budicí signál a ozvěna [5].

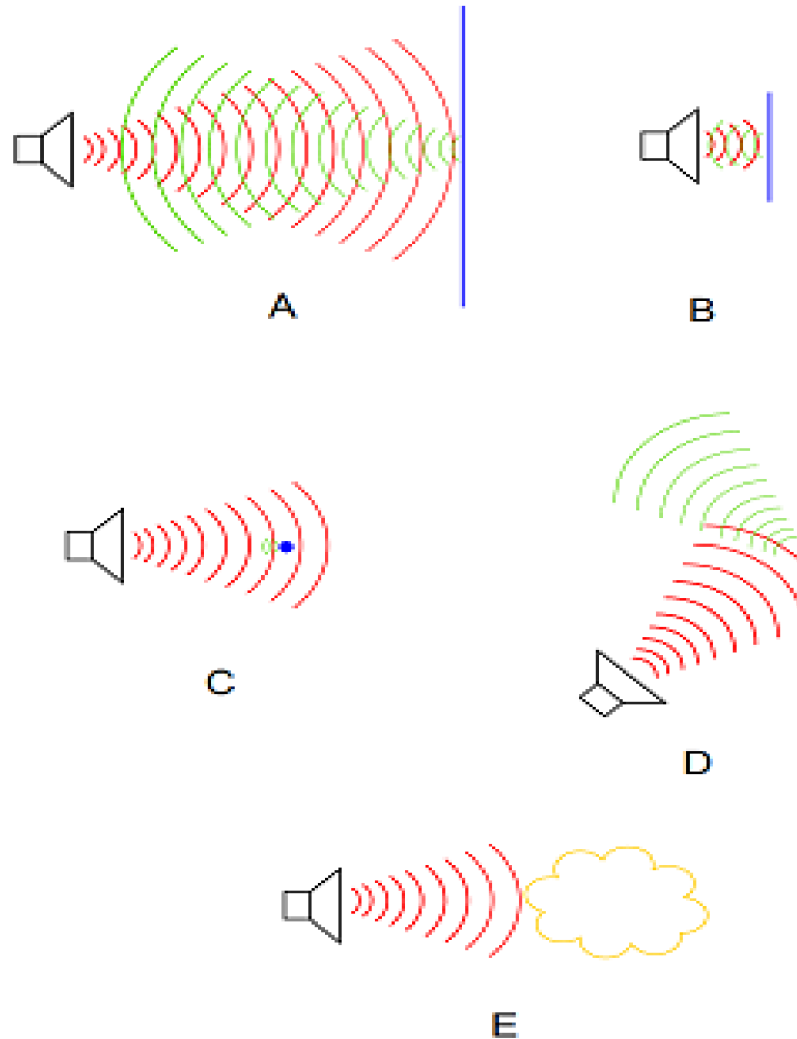
Malé objekty vykazují slabší signál, a ten se dá pak vyfiltrovat a charakterizovat jeho rozměr. Snímáním specifických rozměrů je využito v medicínských zobrazovacích technikách. Stejně se využívá v průmyslu pro zjišťování stavu objektů. Pro určování vzdálenosti objektu od sensoru se doba letu podělí dvěma, vlna musí vzdálenost urazit dvakrát. Výpočet se vynásobí rychlostí zvuku ve vzduchu (prostředí) což je kolem 343 m/s pro teplotu 20°C.

Pro určování vzdálenosti se použije následující vzorec:

$$d = \frac{t_{ToF} \cdot c}{2} [m], \quad (2.12)$$

kde d je vzdálenost v metrech, t_{ToF} je doba letu vlny v sekundách a c je rychlost zvuku daného prostředí v metrech za sekundu [5].

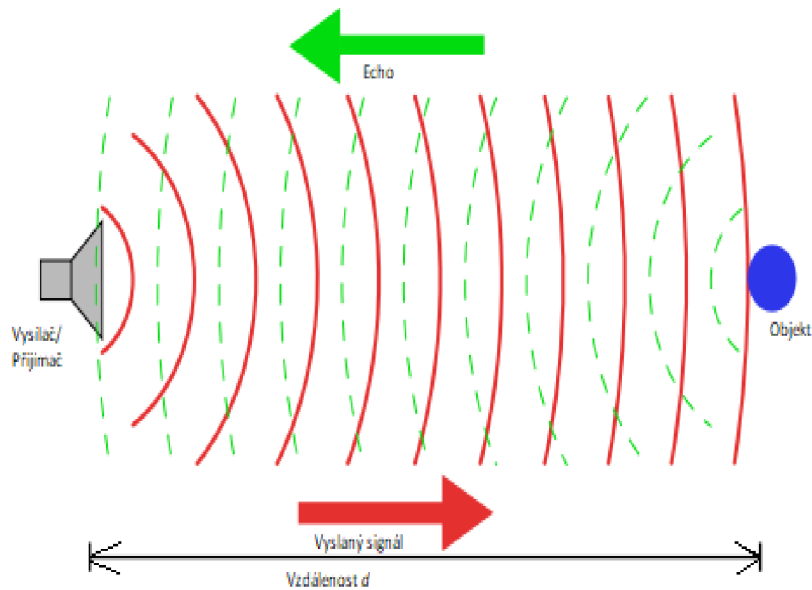
Pro názornost možností špatných odrazů slouží obrázek 2.10.



Obrázek 2.10: Varianty špatných ozvěn [18].

Na obrázku 2.10 ve varientě A je objekt moc daleko od senzoru a přijatý signál je příliš utlumen. Naopak ve varientě B je objekt příliš blízko senzoru a tím pádem senzor neopustí režim vysílání signálu a nemůže začít přijímat signál.

A správný přenos signálu je na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11: Správné snímání vzdálenosti [19].

Správné určení vzdálenosti objektu od senzoru je důležité zajistit dostatečné podmínky. Objekt se nesmí nacházet moc daleko, až by došlo ke ztracení signálu, způsobem rozplynutím se v prostředí dříve, než by signál dorazil k senzoru. Naopak, nesmí být umístěn moc blízko, aby se signál neztratil ve vlastní rezonanci senzoru a tím nebyl odečten. Poslední se označuje jako „*dead zone*“ neboli mrtvá zóna. V mrtvé zóně sensor není schopen správně zaznamenat vzdálenost objektu od zařízení. Vlastnost minimální vzdálenosti, případně maximální vzdálenosti, je dána konstrukčním provedením senzoru a doplňkovým řídicím obvodem. Doplňkový řídicí obvod zajišťuje dostatečný rozkmit a velikost budicího napětí a zároveň napomáhá k samotnému rychlému útlumu. Doba dozívání rozkmitaného transduceru je ovlivněna i samotným rezonančním obvodem. Pro tento rezonanční obvod se dá použít jednoduchý paralelní RLC obvod s vlastní frekvencí přibližně stejnou, jakou má transducer, který je zapojen paralelně k RLC obvodu. Dobu kmitu a dokmitu velmi ovlivňuje zvolený poměr hodnot kondenzátoru C a cívky L . Pokud bude cívka malá, tlumení bude malé a doba kmitání obvodu, který se přeneše až k zesilovači, bude výrazně vyšší než při větší hodnotě. Hodnotu kondenzátoru volíme v násobcích deseti a indukčností cívky doladujeme potřebnou časovou konstantu obvodu pro potřebnou frekvenci³. Součástky jsou na trhu v omezeném rozsahu výběru. V důsledku toho jsou kladeny vysoké požadavky na výběr vhodné hodnoty cívky požadované velikosti, která by byla i konstrukčně stabilní pro případné větší proudy. Problematika návrhu obvodu s ohledem na omezenou velikost zařízení a případně i cenu se je diskutována v dalších kapitolách.

³V našem případě je to 40 kHz, lze však pracovat i s jinými vlastními frekvencemi sensorů, jako je například 58 kHz, což je také častá hodnota

2.2 Dostupná provedení ultrazvukových senzorů

V podkapitole 2.2 je uveden výčet vybraných ultrazvukových senzorů pro měření vzdálenosti na trhu. Dále je v textu uvedeno provedení a základní rozdělení ultrazvukových senzorů dle topologie a dle návrhu obvodu.

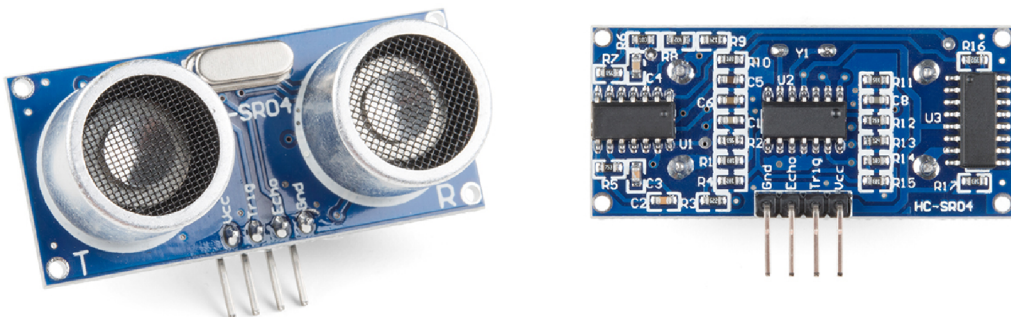
2.2.1 Ultrazvukové sensory dostupné na trhu

V následujícím textu jsou popsány vybrané sensory běžně dostupné, které se dají buď koupit nebo mohou být vyrobeny podle volně dostupných návrhů s popisy. V textu je dále uveden jeden zástupce průmyslového řešení a sensoru používaného v automobilech. Ultrazvukové sensory vzdálenosti mají následující označení:

- HC-SR04
- JSN SR04t-2.0
- AN2281
- AVR42779
- TIDA-01386
- Valeo - 4H0 919 275

HC-SR04

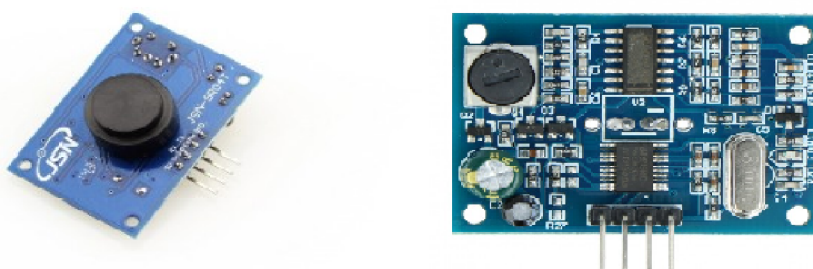
Sensor HC-SR04 je široce využíván při kutilských a technicky nenáročných aplikacích. Jeho výhodou je nízká cena a dostupnost. Sensor HC-SR04 je velmi oblíben a mnohdy využíván pro spoustu domácích robotů. Dle datasheetu je jeho dosah mezi 2 cm a 4m. Sensor HC-SR04 pracuje na vlastní frekvenci 40kHz. Po budícím signálu sensor vygeneruje 8 pulsů a potom snímá dobu letu vlny. Pokud cílový objekt nemá alespoň 0.5 čtverečních metru, tak mohou být výsledky ovlivněny nepřesným snímáním [27]. Sensor využívá MOS-FET kontrolér pro řízení vysílacího signálu a integrovaný obvod se třemi zesilovači, které tvoří filtrační a zesilovací část sensoru.



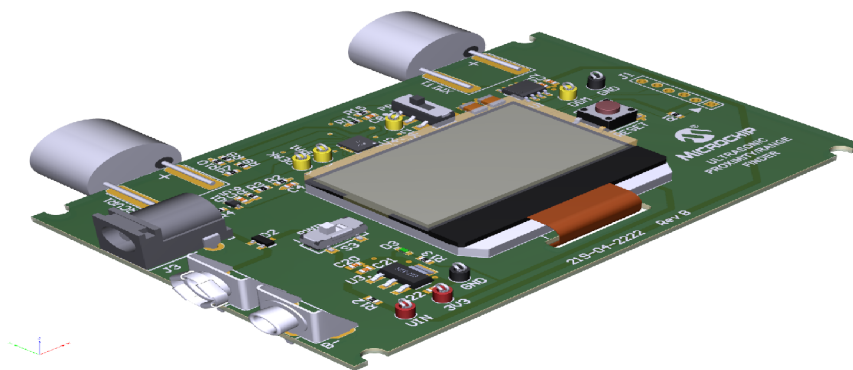
Obrázek 2.12: Sensor HCSR04 [23].

JSN-SR04t-2.0

JSN SR04t-2.0 je sensor navržený pro náročnější aplikační situace než sensor HC SR04. Využívá metody transformátorového řízení s transducerem pracujícím jako přijímač a současně jako vysílač. Transformátor je využit, jelikož je potřeba vybudit vyšší napětí pro voděodolné pouzdro transduceru. Běžně se využívá 80 nebo 120 Vpp. Naopak transducery s otevřeným pouzdem se většinou používají na 20 Vpp. Sensor snímá vzdálenost na 20^4 až 600 cm. Vyšší napětí je vyžadováno proto, aby se signál dostal přes pouzdro dostatečně daleko a s dostatečným tlakem signálu [24].



Obrázek 2.13: Sensor JSN SR04t-2.0

AN2281 a AN1536 Ultrasonic range finder

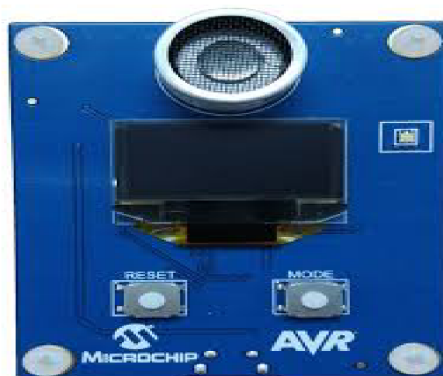
Obrázek 2.14: Ultrasonic range finder AN1536 a AN2281 [20].

Ultrasonic range finder používá řízení MOS-FET driveru pro ovládání transduceru. Jeho měřicí rozsah je od 30 do 288 cm. Je to nekomerční zařízení od společnosti Microchip Technology. Kde se využívá jednoho μ U kontroléru PIC16F1769 v miniaturním pouzdře QFN, MOS-FET driveru a integrovaných zesilovačů. Používá dva transducery. Jeden je jako přijímač a druhý jako vysílač [20].

⁴viz příloha č.2

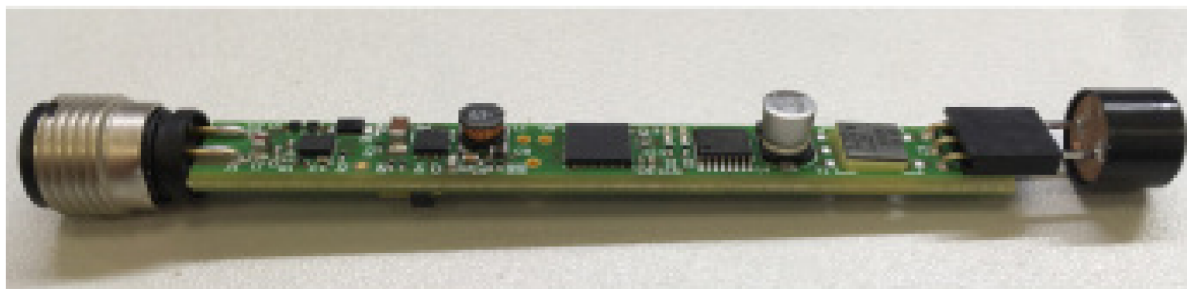
AVR42779 Core Independent Ultrasonic Distance Measurement

Jedná se o podobné řešení, jako v případě AN2281 a AN1536. Na rozdíl od předešlé jednotky⁵ využívá jen jeden transducer pro přijetí a vyslání signálu. Je využit chip ATtiny817, který se svými kvalitami rovná třeba PIC16F1769. Jsou to srovnatelná zařízení. ATtiny817 je mírně rychlejší, nabízí o jeden porovnávací modul navíc, avšak méně programovatelné paměti a má méně časovačů než PIC16F1769, oba nabízí komparátory a další funkce. Avšak pro potřeby sensorů měřících vzdálenost pomocí ultrazvuku, nemají nedostatek periférií. AVR42779 nabízí rozsah od 70 do 400 cm [16].



Obrázek 2.15: Core Independent Ultrasonic Distance Measurement with ATtiny817 - AVR42779 [16].

TIDA-01386 Ultrasonic Distance Sensor



Obrázek 2.16: TIDA-01386 Ultrasonic Distance Sensor[21].

Sensor TIDA-01386 je zařízení pro měření vzdálenosti od 10 do 30 (300kHz) cm a od 30 do 500 (58kHz) cm. Zařízení využívá ultrazvukový procesor a řídicí jednotku transduceru PGA 460. PGA460 je součástka, která slouží jako integrované řešení pro řízení ultrazvukového sensoru. Poskytuje možnost zapojení jak pro MOSFetovou, tak transformátorovou metodu buzení signálu. Je to řešení, které šetří součástky a místo a je speciálně navrženo, pro snímání vzdálenosti pomocí ultrazvuku [21].

⁵AN2281 a AN158 Ultrasonic range finder

Valeo - 4H0 919 275

Sensor od firmy Valeo Germany používají automobilové firmy patřící koncernu Volkswagen. Sensory jsou zabudovány do předního a zadního nárazníku a 4 na bocích automobilu. Snímač Valeo-4H0 919 275 je ústřední jednotkou parkovacího asistenta. Dosah snímače je 2 až 3 m [7], [13].



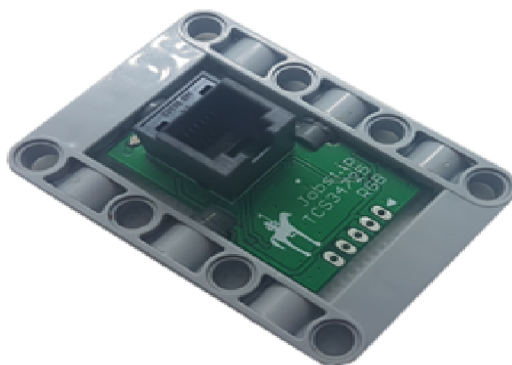
Obrázek 2.17: Ultrazvukový sensor - Valeo

2.2.2 Zařazení našeho řešení do řady existující zařízení

Naše požadavky na sensor pro jobst.io jsou:

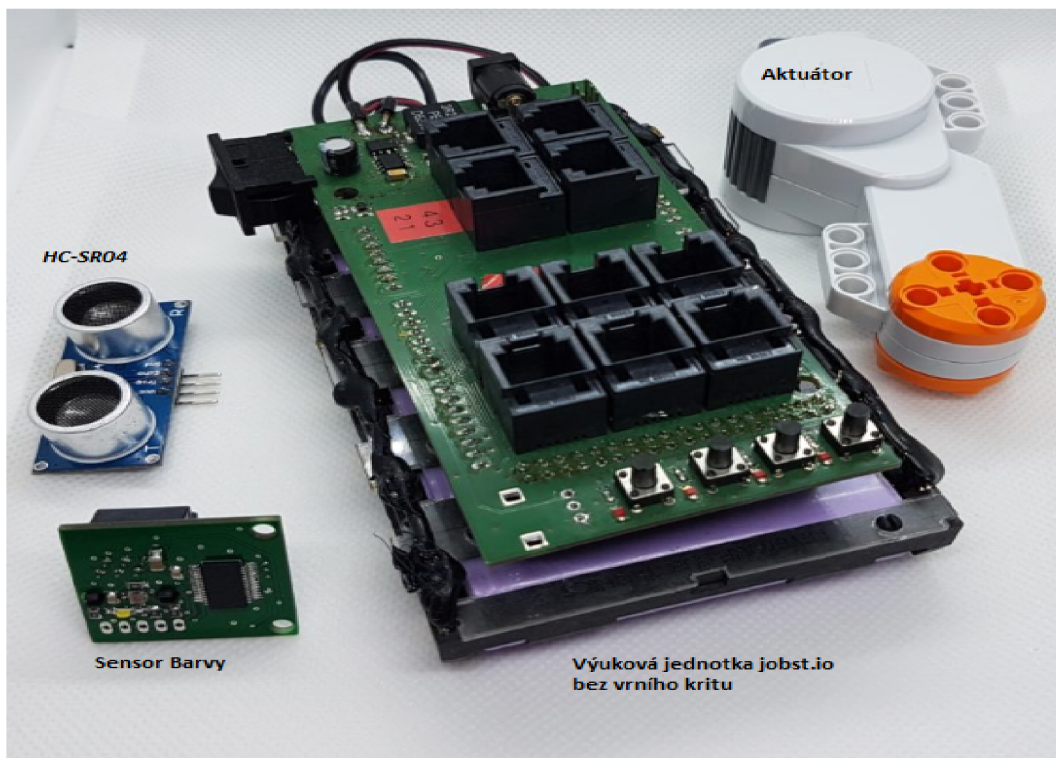
- Velikost - 37x14 cm
- Vlastní provedení
- Transducer - jak přijímač tak vysílač
- Napájecí napětí modulu je 3,3 V

Jelikož předchozí zařízení nevyhovují topologii LEGO pouzdra, a proto je požadován nový návrh modulu, který by topologii pouzdra odpovídal. Zároveň je potřeba při návrhu dbát i na výše zmíněné požadavky. Na DPS je třeba umístit všechny potřebné součástky a konektory, tak, aby se zařízení dalo naprogramovat a používat. Pouzdro, do kterého se zařízení musí vejít je vyobrazen na obrázku 2.18.



Obrázek 2.18: LEGO uložení pro DPS [32].

Modul je zamýšlen jako náhraní řešení pro výukovou platformu jobst.io. Tato platforma je postavena na Arduino® MEGA 2560. Na tuto jednotku byl vytvořen nastavný modul, který sdružuje vstupy pro sensory, aktuátory a motory. Zároveň slouží jako elektrický zdroj pro různá zařízení. Lze jej připojit přes USB k počítači. Obsahuje obvod pro přesné ovládání motorů pomocí proudu. Dále je do něj zabudován gyroskop, akcelerometr a magnetický a napěťový snímač. Jednotka dále komunikuje po sériové sběrnici SPI. Pro výukovou platformu jobst existují již moduly pro snímání setrvačnosti, snímání barev, externí tlačítka a DPS adaptér pro ultrazvukový sensor vzdálenosti HC-SR04. Pro ultrazvukový sensor je požadováno vlastní řešení, které by bylo originálním řešením, stejně jako sensor snímání barev, pro výukovou platformu. Pro naše zařízení je zvolen kontrolér PIC16F1769 [30], stejně jako u provedení AN2281 a AN1536. Výhody PIC16F1769 jsou v podkapitole 2.4.1 na straně 27.



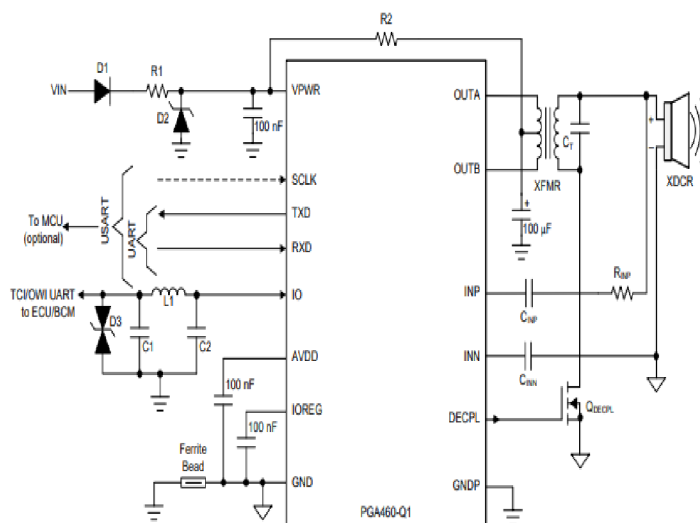
Obrázek 2.19: Výuková platforma jobst.io [32].

2.2.3 Transformátorová a přímá metoda ovládání transduceru.

Jak již bylo výše zmíněno, existují dvě metody pro navrhování ultrazvukových sensorů vzdálenosti: transformátorová metoda a přímá metoda. Transformátorová metoda je nejvhodnější pro sensory, které jsou v uzavřeném pouzdře a pro vytvoření dostatečného tlaku pro vstup vzduchem, je potřeba běžně potřeba dodat 80 až 120 Vpp na transduceru. Je to zároveň výhodné pro galvanické oddělení řídicí elektroniky od takhle vysokého napětí. Přímá metoda se běžně používá při využití sensorů s otevřeným pouzdrem, která se běžně vyrábějí pro 20 až 50 Vpp. Pro více jak 38 Vpp je těžší a dražší sehnat certifikované součástky a proto je výhodnější pro určité aplikace použít transformátorovou a pro jiné přímou metodu.

Transformátorová metoda

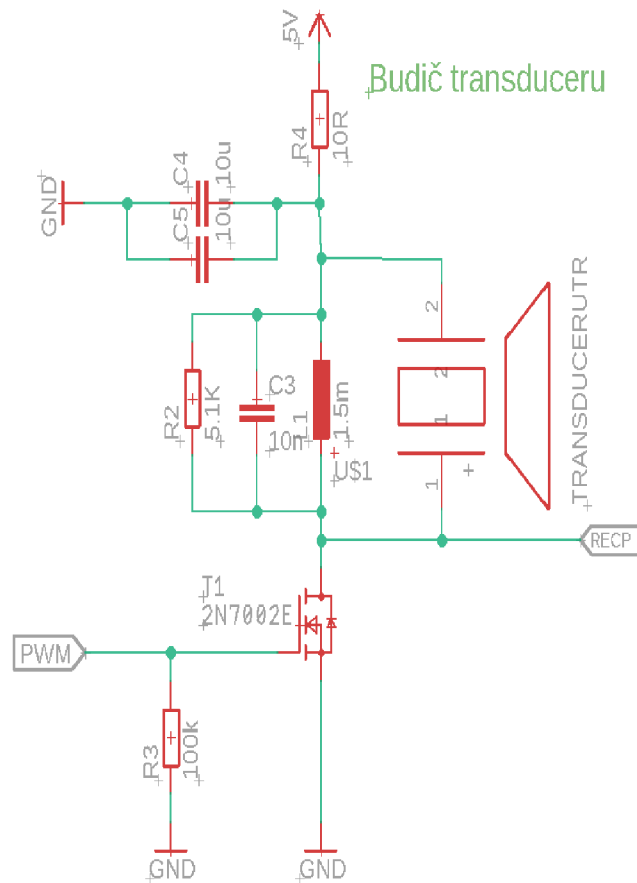
U transformátorové metody je důležité zvolit správný transformátor se správným počtem závitů na primárním a sekundárním vinutí. Transformátor se volí se středním vývodem na primárním vinutí, kterým je dodáváno stejnosměrné napětí na primárním vinutí, které je pak násobkem převedeno na sekundárním vinutí. Buzení je na primární vinutí přímo přivedeno z kontroleru. Na sekundárním vinutí je pak vyveden signál na pozitivní vstup komparátoru do kontroleru, který pak zpracovává kmitající signál. Příklad zapojení s řídicí jednotkou ultrazvukových sensorů je možno vidět na obrázku 2.20. Metoda je výhodná pro transducery s uzavřeným pouzdem, který vyžadují vyšší napětí[21].



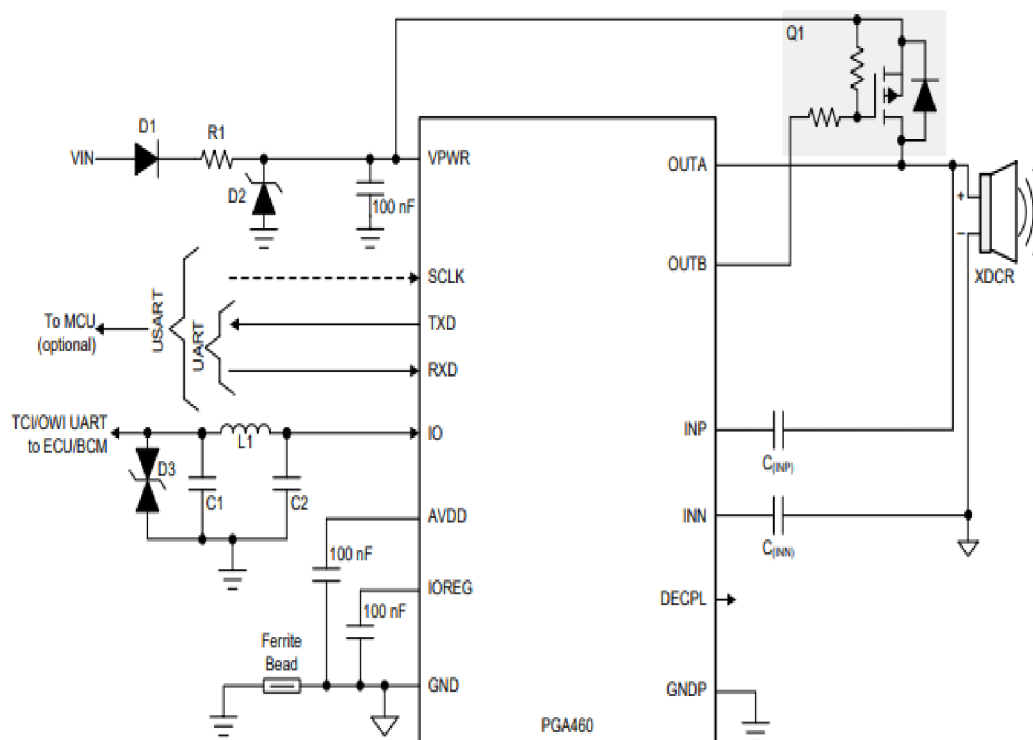
Obrázek 2.20: Transformátorová metoda[21].

Přímá metoda

Přímá metoda je metoda, která nahrazuje řízení transformátoru. Využívá řízení můstkového zapojení MOS-FETu, které je ve formě „half-bridge“ nebo „full-bridge“. Pomocí jednoho MOS-FET lze řídit přijímání a vysílání signálu jedním transducerem. Pomocí PWM se spíná MOS-FET, který pak vytváří na transduceru požadované kmity o požadované amplitudě. Metoda se dá použít na zavřené i otevřené topologie sensoru, ale nejlépe se zvuk přenáší přes otevřené pouzdro a nemá takové požadavky na vysoké napětí. Metoda lze realizovat, jak pomocí PGA460 řídicí jednotky, která se dá využít i při transformátorové metodě. Mimo to se může přímo spínat MOS-FET z kontroléru a to i v případě transformátoru. Běžná metoda pro měření vzdálenosti je metoda přímá s použitím můstkového integrovaného obvodu. Přímá metoda se využívá většinou pro transducery s otevřeným pouzdem. v případě PGA460 [29] se přidá minimálně jeden externí transistor typu P-MOS-FET, jak je na obrázku 2.22.



Obrázek 2.21: Budič transduceru pomocí RLC.



Obrázek 2.22: Přímá metoda s ultrazvukovou řídicí jednotkou [29].

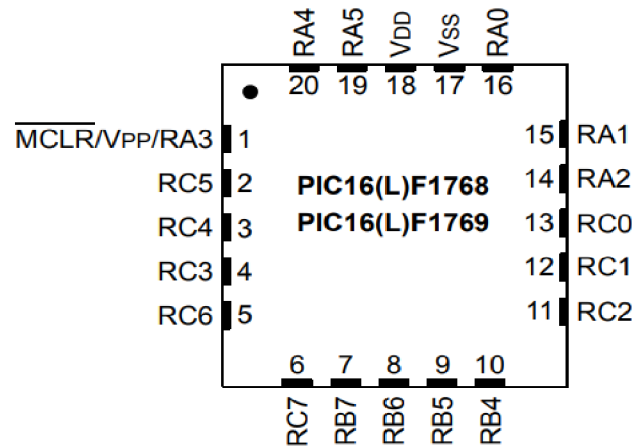
2.3 Řídící jednotky pro Transducery

	HV7360	TUSS4470	TUSS4440	PGA460
Typ zařízení	Analogové zpracování	Analogové zpracování	Analogové zpracování	Analogové a digitální zpracování
Pracovní frekvence	až 35Mhz	40kHz - 1MHz 40 - 440kHz (před řízení)	40kHz - 400kHz	30 - 80kHz & 180 - 480 kHz
Počet kanálů	1	1	1	1
Topologie řízení	Přímo řízené (do ± 100 V)	Přímo řízené (do 36 V) Před zpracované	Transformátorově	Transformátorově Přímo řízené s transistorem typu FET
Zesílení	-	86 dB logaritmický zesilovač	86 dB logaritmický zesilovač	6 bodové časově proměnné (32 až 90 dB)
Výstupy	T/R přepínač	Analogová obálka ozvěny Průchod nulou Detekce prahu obálky	Analogová obálka ozvěny Průchod nulou Detekce prahu obálky	-DSP řízený výstup (čas letu, amplituda, šířka) Vzorkování obálky ozvěny Surová cesta k digitálním datům (ADC, pásmová propust, rozvaděč, dolní propust)
Teplotní čidlo	Nic	Nic	Nic	Teplotní sensor v zařízení
Diagnostika	Nic	SPI diagnostika	SPI diagnostika	Diagnostika systému (frekvence, dozvuk, výstupní napětí) Diagnostika napětí
Určeno pro automobilový průmysl	Nic	Nic	Nic	PGA460-Q1
Výstupní rozhraní	Nic	SPI na programování Analogový výstup	SPI na programování Analogový výstup	USART (UART + SPI) OWU TCI
Výrobce	Microchip	Texas Instruments	Texas Instruments	Texas Instruments

Tabulka 2.2: Přehled zařízení pro řízení piezoelektrických jednotek [33]

V tabulce můžeme vidět přehled různých dostupných řídicích jednotek, které nabízejí komplexní řešení pro řízení piezoelektrických měničů. První uvedený od firmy Microchip je jen řídicí jednotka. Firma Microchip nenabízí komplexní řešení, jako firma Texas instruments, ale několik různých samostatných jednotek, které je spolu potřeba spojit, aby nabídlo stejnou funkcionalitu jako třeba PGA460. Dají se zvolit jednodušší nebo složitější zařízení, nejvhodnější je PGA 460, které nabízí obě metody řízení, diagnostiku a spoustu dalších funkcí, které se dají využít tak, aby bylo možné ušetřit užití externích součástek a vyvarovat se obvodových chyb.

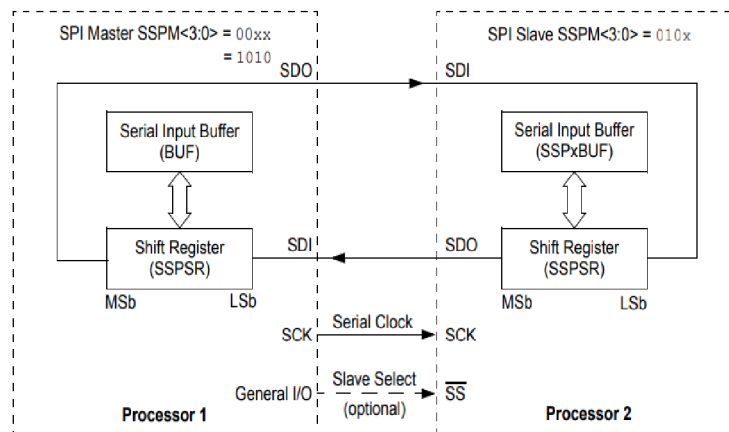
2.4 Mikrokontrolér PIC16F1769



Obrázek 2.23: Mikrokontrolér PIC16F1769 v pouzdře QFN [30].

Kontrolér z rodiny PIC16 nabízí dostatečně velkou programovatelnou paměť, komunikační protokoly (UART, SPI, I2C), časovače, analogové vstupy a výstupy, digitální vstupy a výstupy, integrované komparátory a operační zesilovače. Poskytuje také Datový Signálový Demodulátor DSM, Pulsně Šířkovou Modulaci PWM a Nastavitelné logické buňky CLC [30].

2.4.1 SPI - Sériové periferní rozhraní



Obrázek 2.24: SPI přenos dat [30].

Sériové periferní rozhraní je synchronní sériová datová komunikace, které pracuje ve Full-Duplex konfiguraci. Full-Duplex umožňuje zároveň odesílat a přijímat data. SPI sběrnice disponuje nastavením master/slave. Master zahajuje komunikaci a slave je určen Slave Select (SS) pinem. SPI zprostředkovává komunikaci s vícero zařízeními, kde master zahajuje pomocí Slave Selectu komunikaci s podřízeným zařízením. To znamená, že pokud není slave zvolen, tak je odpojen. Výuková jednotka používá pro komunikaci SPI, kde je jako master zařízení a připojované moduly jsou slave zařízení. Pro nastavení SPI je potřeba nastavit polaritu a další vlastnosti protokolu tak, aby správně komunikoval s jednotkou [30].

3 Cíle řešení

V této kapitole bude rozvedena problematika jednotlivých cílů zadání, jejichž obsah je rozveden v závislosti na řešerši a zaznamenaných potížích sledovaného problému. V cíli č.2 je rozvedena problematika snímání vzdálenosti pomocí jednoho sensoru jako přijímače a druhého jako vysílače. V cíli č.3 je rozveden problém snímání různých metod snímání vzdálenosti pomocí ultrazvuku a okolnosti dozvuku transduceru a limity snímání vzdálenosti monostatickým transducerem. V kapitole o cíli č.4 je rozveden problém návrhu finální DPS a rozvinutí způsobu, jakým se bude daný cíl naplňovat. Pro zjednodušení plnění cílů se použije stejná DPS pro 2. a 3. cíl.

Cíle

1. Proveďte řešerši dostupných ultrazvukových sensorů a analyzujte možná zapojení.
2. Zprovozněte vlastní DPS a realizujte měření za použití 2 ultrazvukových transducerů, kde použijete jeden jako přijímač a druhý jako vysílač.
3. Zprovozněte vlastní DPS pro ultrazvukový sensor, kde za pomoci jednoho transduceru dokážete změřit vzdálenost objektů před senzorem.
4. Na finální DPS dle předem daných požadavků na velikost integrujte mikrokontrolér a měřenou vzdálenost odesílejte zprávami po sběrnici SPI.

Piezoelektrické transducery					
Jméno	UTR-1640K-TT-2-R	MA40S4R	UTR-1440K-TT-R	400EP18A	250ST160
Výrobce	PUI Audio	Murata	Pui Audio	PROWAVE	PROWAVE
Frekvence	40kHz	40kHz	40kHz	40kHz	25kHz
Typ	Ultrazvukový	Ultrazvukový	Ultrazvukový vodotěsný	Ultrazvukový vodotěsný	Ultrazvukový
Pouzdro	Otevřené	Otevřené	Uzavřené	Uzavřené	Otevřené
Kapacita	2100pF	2550pF	1800pF	2600pF	2600pF
Tolerance kapacity	±20%	±20%	±15%	±20%	±20%
Přímost	80°	80°	70°	15°	85°
Celková citlivost	-60dB	-63dB	≥ 200mV	-75dB	-62dB
Teplotní podmínky	-20° ~ +70°	-40° ~ +85°	-40° ~ +80°	-20° ~ +70°	-30° ~ +70°
Maximální vstupní napětí	20Vpp	20Vpp	140Vpp	100Vpp	20Vpp

Tabulka 3.1: Příklady různých dostupných typů sensorů

3.0.1 Dostupné metody pro buzení signálu prvního a druhého cíle

Z prvního cíle v rešeršní části 2.2 práce vyplývá několik možností, které se používají při návrhu ultrazvukového měřidla vzdálenosti. Jsou zde metody přímo a nepřímo (transformátorově) řízené. Pro obě metody existuje více variant řešení. V obou případech však platí, že je potřeba naplnit kritéria použitého piezoelektrického snímače. Různé typy jsou v tabulce 3.1 výše.

Pro účely všech cílů postačí sensor v prvním sloupečku *UR-1640K-TT-2-R*. V úvahu při návrhu je důležitá kapacita, přímota, frekvence a maximální vstupní napětí. Pro zvolený návrh je kapacita 2100 pF. Dále je potřeba přivést v jakékoliv variantě buzení transduceru dostatečně velké napětí, aby rozkmit na transduceru byl alespoň 50% maximálního vstupního napětí, ale maximální vstupní jmenovité napětí je nejefektivnější. Rozkmit napětí na transduceru musí mít vlastní frekvenci transduceru, což je v 40kHz.

Pro vybuzení kmitavého signálu o frekvenci 40kHz transduceru, poslouží RLC paralelní obvod, který dokáže v paralelním připojení k transduceru rozkmitat napájecí napětí do požadované výše V_{pp} vstupního napětí transduceru. Tato metoda byla využita u zařízení AVR42779 v podkapitole 2.2.1 na straně 21. jelikož dokumentace k této metodě je kvalitní, rozhodlo se, že se této metody použije pro konstrukci prototypu a zkoumání funkčnosti a sestavení monostatického snímače.

3.1 Cíl druhý

Zprovoznění DPS pro měření vzdálenosti pomocí dvou samostatných zařízení chovajících se jako vysílače a přijímače. V tomto cíli je nutné zjistit, jakým jednoduchým způsobem se dá vybudit odpovídající signál na transduceru. Zkoumat úskalí a funkcionalitu daného sensoru a na které věci se zaměřit. Je důležité si chování tohoto uspořádání prostudovat a vyvodit další důsledky. Pokud to bude možné, změří se několik příkladných vzdáleností pomocí osciloskopu a znázorní se na vyobrazení z osciloskopu.

3.2 Cíl třetí

Zprovoznění jedné DPS pro měření vzdálenosti pomocí jednoho zařízení. Transducer se vybudí na stejnou frekvenci po určitou dobu a zároveň se bude snímat na vývodu transduceru přijaté echo. Doba letu vlny se odečte na osciloskopu a určí se vzdálenost. Probere se úskalí monostatické konfigurace. Mimo jiné zde bude uvedena měřicí konfigurace.

3.3 Cíl čtvrtý

V cíle tři je uvedeno zabudovávání měniče zvyšujícího napětí, zesilovací obvod a zpracování signálu. Časování přijaté vlny na komparátor a okolnosti vyhodnocování signálu. Dále zde bude rozebrána DPS pro 4. cíl a potíže s návrhem napájení, zesilování signálu. Dále bude realizováno odesílání snímaných dat po sběrní SPI.

4 Postup řešení a výsledky

V kapitole jsou popsána měření pro cíle zmíněné v předchozí kapitole s patřičnými výsledky, jejich obvodová řešení a postupy provedení. Dále je v textu prezentováno naplnění těchto cílů a obtíže při cestě za jejich dosažením.

4.0.1 Budící obvod

Při sestavování střídavého napětí požadované frekvence 40kHz pomocí PWM signálu, bylo přivedeno PWM na Gate N-MOSFET transistoru 2N7002e [15] a na Drain transistoru bylo přivedeno napájení, které vede přes paralelní rezonanční RLC obvod, který vytváří rezonanci požadovaného napětí na transduceru. Napájecí napětí budícího obvodu musí být dostatečné, aby byl rozkmit na určitém typu transduceru. Jelikož může být napájení zašuměné, je před RLC obvodem RC dolní propust, která má filtrovat rušivé signály napájecího napětí. Rovnicí:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (4.1)$$

a požadavkem 40kHz je vypočtena hodnota součinu LC. S ohledem na hodnotu součinu, jsme zvolili v násobcích 10 kapacitu kondenzátoru 10nF a k tomu byla vybrána odovídací cívka. Indukce cívky nesmí být příliš vysoká a velká. Pak by tlumila příliš a vměstnat cívku na menší rozměry DPS by nebylo možné. Zároveň nesmí být odpor cívky příliš veliký, jinak by způsoboval nestabilitu obvodu. Stejně tak není dobré zvolit příliš malou hodnotu indukce, díky které by zas obvod dokmitával tak dlouho, že by snímání vzdálenosti bylo tímto úsekem velmi omezeno. Po simulacích v LTSpice¹ je vhodné zvolit hodnotu 1,5mH. Odpor R se volí mezi 1 k Ω a 10 k Ω , aby nebyl úbytek příliš velký a doba dokmitu byla dostatečně malá. Kdyby hodnota odporu R na obrázku 4.1 byla menší než 1 k Ω , nebyl by rozkmit dostatečný.

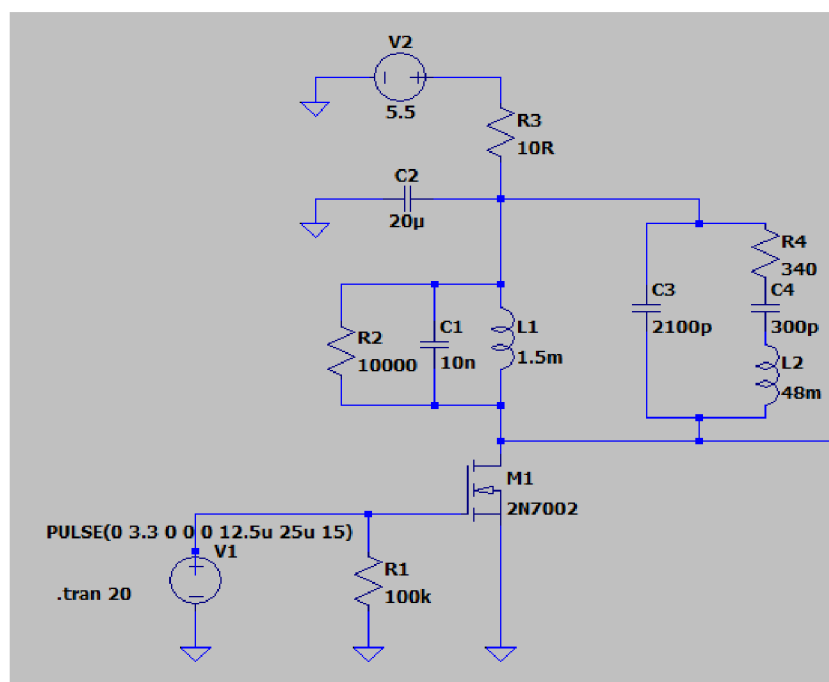
Důležitou vlastností budícího obvodu transduceru je „Peak-to-Peak“ napětí označovaného jako V_{pp} . Je to maximální výchylka od vrcholu k vrcholu vlny, jak lze vidět na obrázku 4.2, kde je střed vlny v 5,2 V a vzdálenost mezi sousedními vrcholky definuje hodnotu V_{pp} . Zde to je vzdálenost od 0V po maximum vrcholu sousední půlvlny 16 V, tedy to je $16V_{pp}$. Tento rozkmit ovládá transducer a vygeneruje z transduceru ultrazvukové vlny, pokud je toto napětí dostatečné v závislosti na parametrech transduceru.

4.0.2 SPICE simulace RLC budícího obvodu

Aby bylo možné sestavit obvod pro DPS, bylo potřeba sestavit SPICE simululaci, která by podpořila předpoklad obvodu a ukázala reakci na určité napětí, počet pulsů a okolní podmínky. Je nutné si vyhledat paralelní kapacitu požadovaného transduceru, která z tabulky 3.1 prvního sloupce je 2100 pF a zapsat do parametrů modelu.

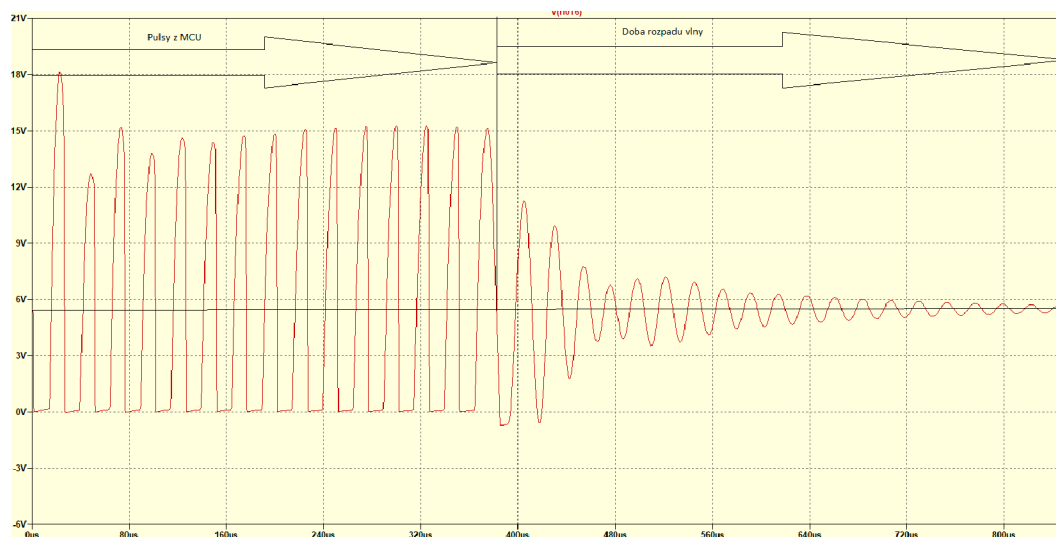
¹Simulace byla uskutečněna před konkrétní konstrukcí DPS

4 POSTUP ŘEŠENÍ A VÝSLEDKY



Obrázek 4.1: LTSpice XVII model buzení transduceru.

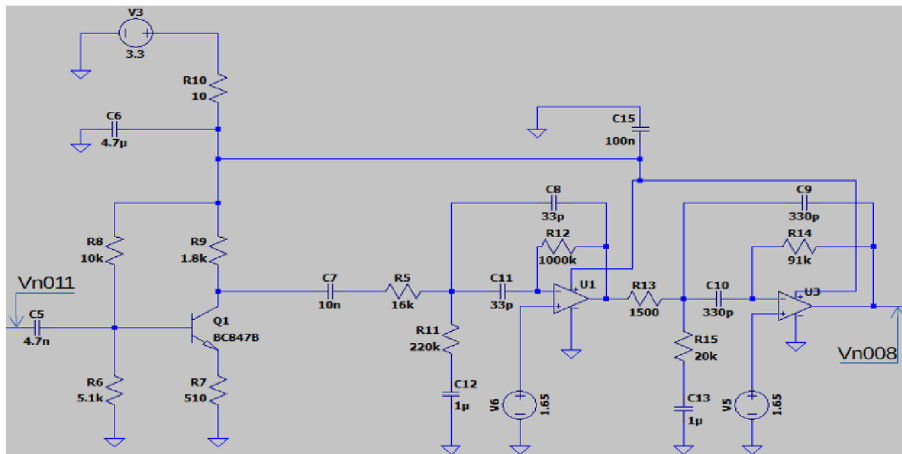
Na obrázku 4.1 je vidět model ve SPICE simulaci, které zahrnuje i hodnoty RLC zmíněné výše. Rozkmit na obrázku 4.2 ukazuje, že lze simulovat a sledovat možné chování obvodu s různými hodnotami součástek. Následně je třeba vytvořit schéma a návrh desky tak, abychom mohli sledovat chování v cíli 2 a v cíli 3. Za budícím obvodem lze sledovat chování a signál, který by mohl být potenciálně zesílen a snímán mikrokontrolérem. Budící signál je zvolen, jako zástupná jednotka signálu z mikrokontroléru a napájení z baterky nebo jiného zdroje.



Obrázek 4.2: LTSpice XVII výstup modelu.

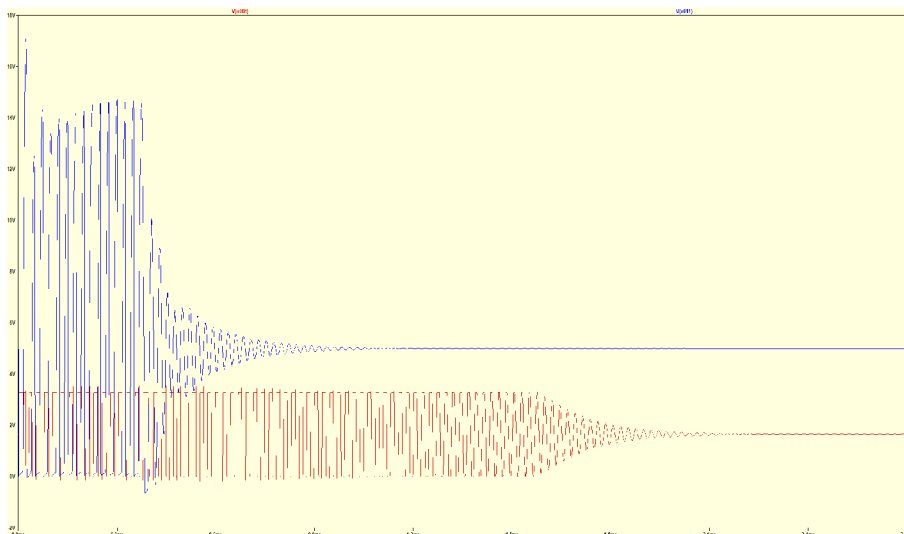
4.0.3 SPICE simulace oddělovacího a zesilovacího obvodu

Pro přijetí a zpracování ozvěny je potřeba pro monostatickou konfiguraci použít impedanční oddělovač a předzesilovač. Použitý obvod je s bipolárním transistorem, který předzesílí signál a oddělí zesilovací obvod od vysokonapěťových impulsů budicího obvodu. Dále signál směřuje do dvoustupňové pásmové propusti čtvrtého řádu, která má zesílení více jak 900. Signál je přenesen na vstup komparátoru v MCU. Schéma z obrázku 4.1 generuje signál označený na obrázku 4.3 jako Vn011, který je pak zesílen následujícím obvodem.



Obrázek 4.3: LTSpice XVII model zesílení signálu.

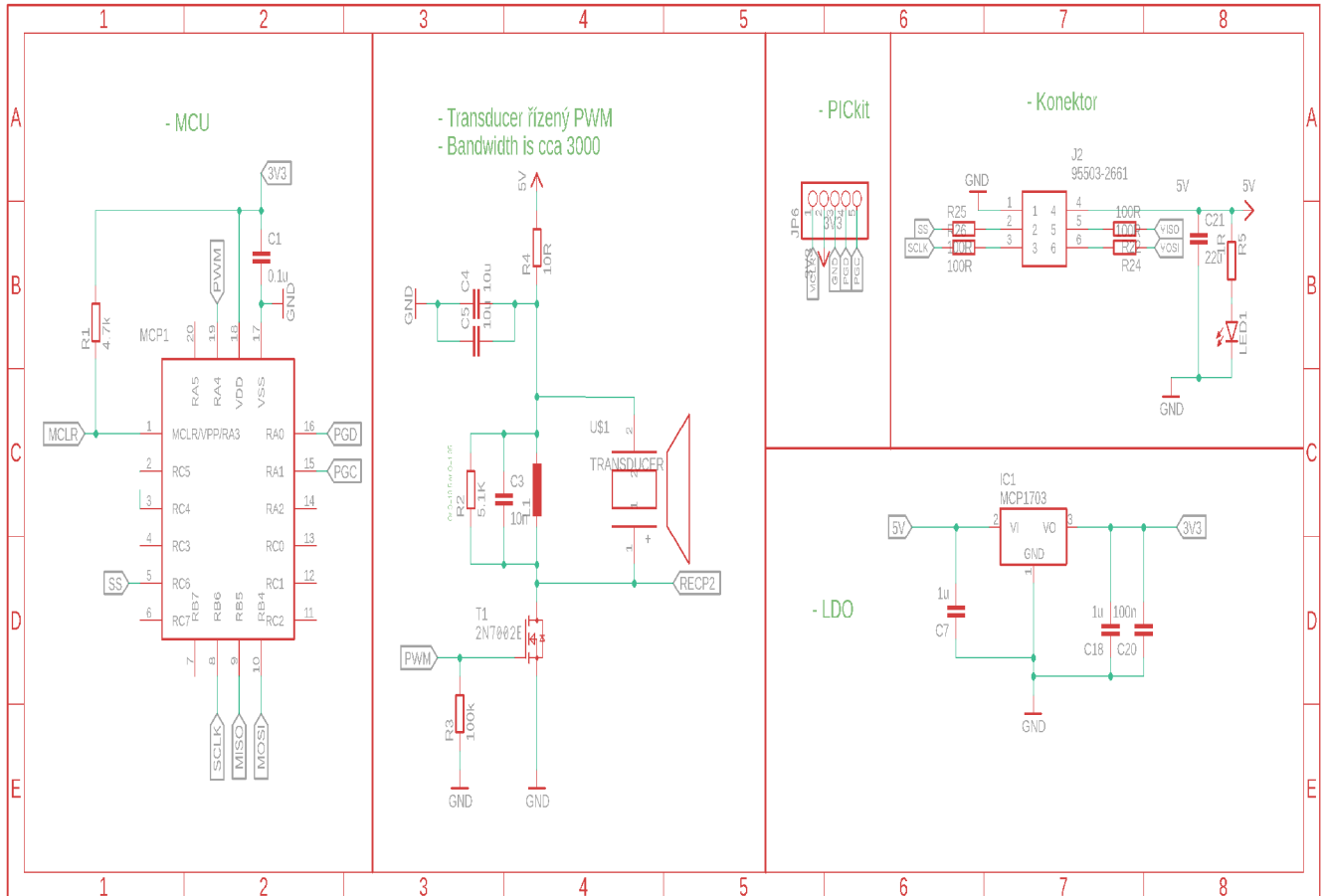
Na obrázku 4.4 níže je vidět budící signál z podkapitoly 4.0.2 (Vn011) a zesílený signál (Vn008), který vede na komparátor MCU. Z obrázku 4.4 je vidět, že doba rozpadu vlny buzeného signálu z obrázku 4.2 na straně 31, je zesilována až dvakrát tak dlouhou dobu, co je viditelná část signálu Vn011 na obrázku 4.4. zesílení takhle slabého signálu zaručuje, že i velmi slabá ozvěna bude dostatečně zesílena. Velkou roli na dobu kmitu hraje výber cívky, kapacity a transduceru.



Obrázek 4.4: LTSpice XVII graf zesilovacího obvodu.

4.0.4 Obvod a DPS pro 2. a 3. cíl

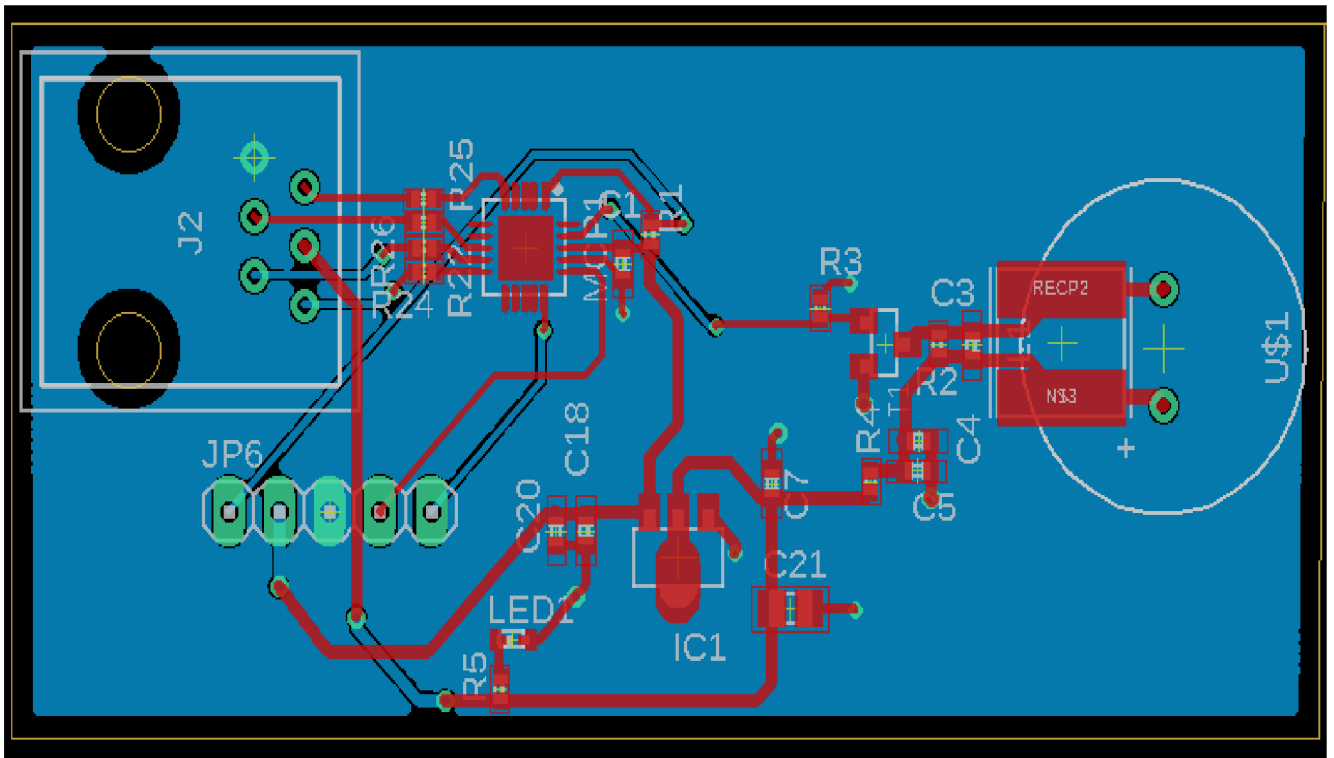
V prostředí Eagle je navrženo schéma a DPS pro snímání signálu. Pro schéma DPS je vybrán výše zmíněný kontrolér PIC16F1769. Obvody pro DPS jsou RLC obvod transduceru, LDO regulátor, který reguluje napětí 5V pro kontrolér 3V3, který však v průběhu návrhu desky nefungoval správně a i po mnohých opravách obvodu. Zároveň je použit konektor pro programování mikrokontroléru a konektor pro napájení a SPI.



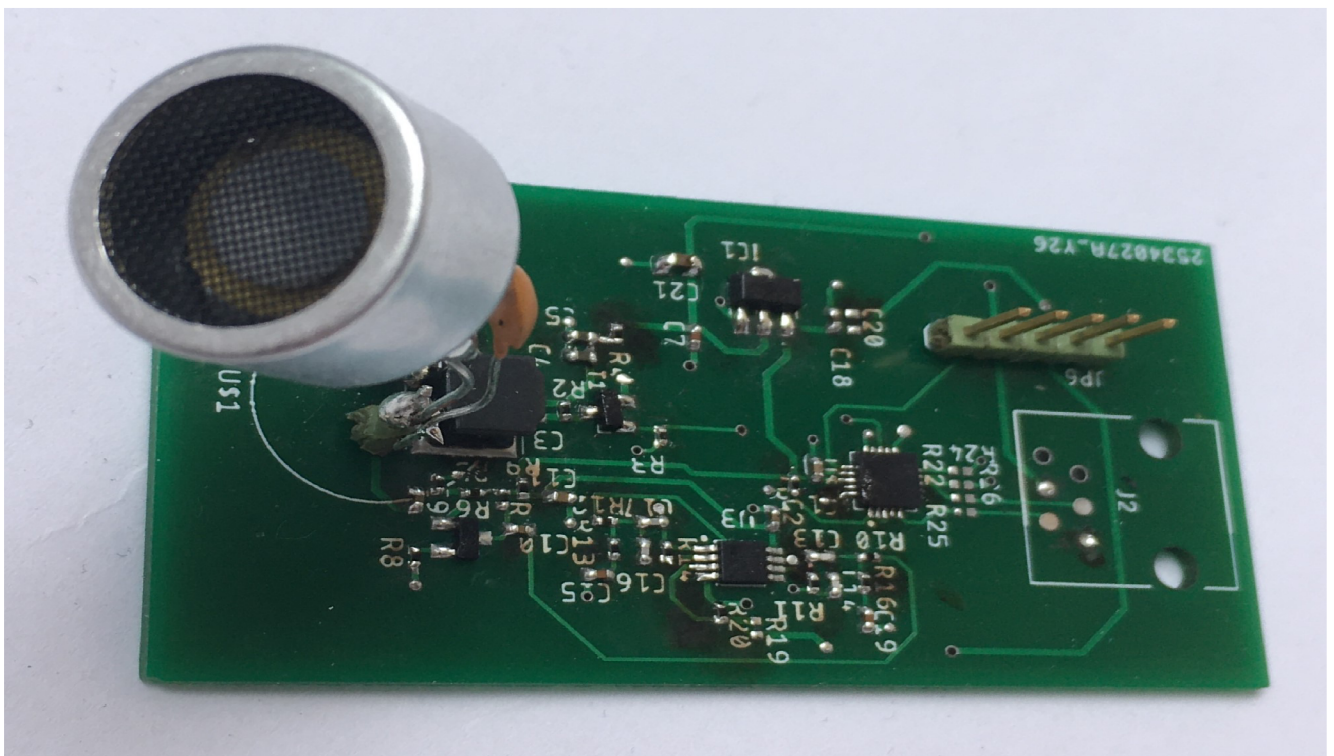
Obrázek 4.5: Schématický návrh DPS.

Na DPS je integrován oddělovací a zesilovací stupeň, který bude zmíněn v podkapitole 4.0.6, zde však není předmětem zájmu. DPS není rozměry přizpůsobena požadovaným rozměrům, jelikož jde o zkušební prototyp se kterým se má realizovat 2. a 3. cíl. Jak je na obrázcích 4.15 a 4.18 na straně 40 a 43 respektive vidět. Tato měření byla provedena a popsána v podkapitolách 4.1 a 4.2 na stranách 40 a 43 respektive.

4 POSTUP ŘEŠENÍ A VÝSLEDKY



Obrázek 4.6: Návrh DPS.



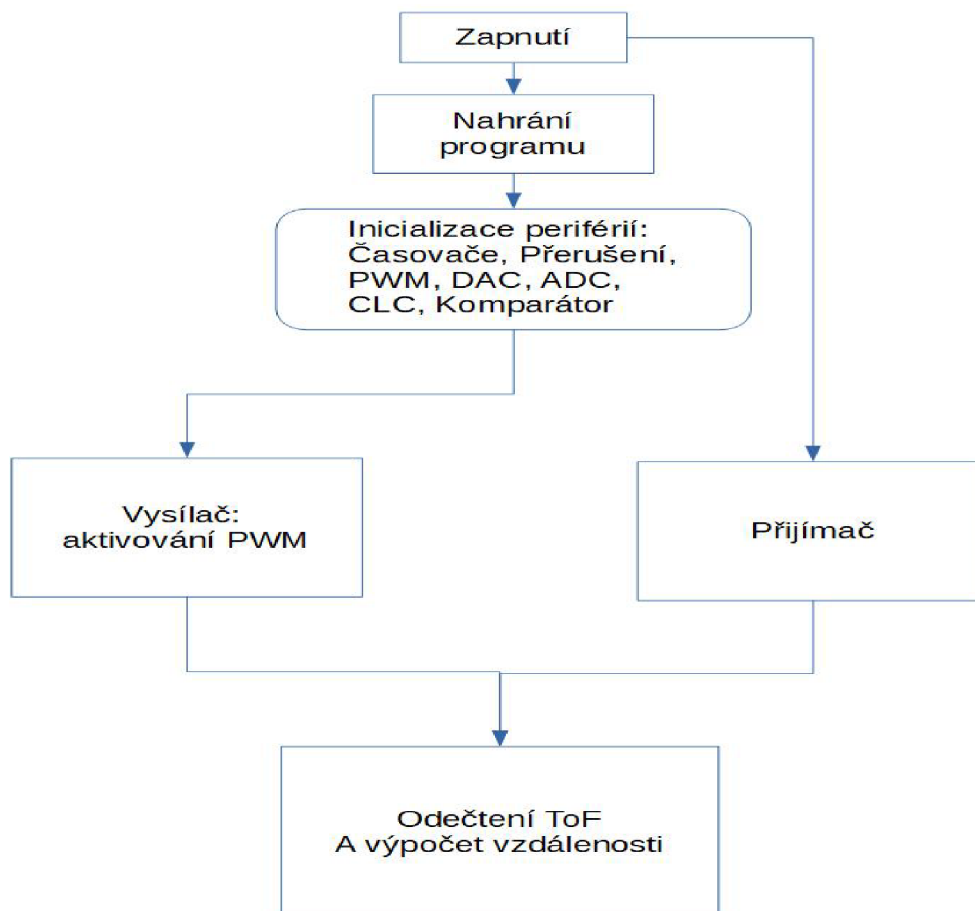
Obrázek 4.7: DPS pro cíl 2 a 3.

4.0.5 Firmware pro měření vzdálenosti cíle 2 a 3

V základním programu pro otestování funkce modulu je nastavena frekvence PWM signálu na 40kHz, což je pracovní frekvence transduceru. Střída PWM je 48% a interval modulace signálu na výstupní pin pomocí periférií DSM a CLC. Signál je modulován na několik pulsů, které spínají MOS-FET a vytvoří tak kmity na ultrazvukovém zařízení. Díky tomuto kontrolovanému spínání a pak neustálému přijímání a vyhodnocování signálu jsme schopni odečíst dobu letu.

Pro základní jednosměrné měření signálu, to znamená jeden modul vyšle signál a druhý přijímá, stačí na jednom modulu nastavit vysílání a vypnout přijímání signálu a na druhém modulu vypnout vysílání signálu. Signál snímáný na osciloskopu je pak porovnán s vyslaným signálem a odečtena doba letu ultrazvukové vlny.

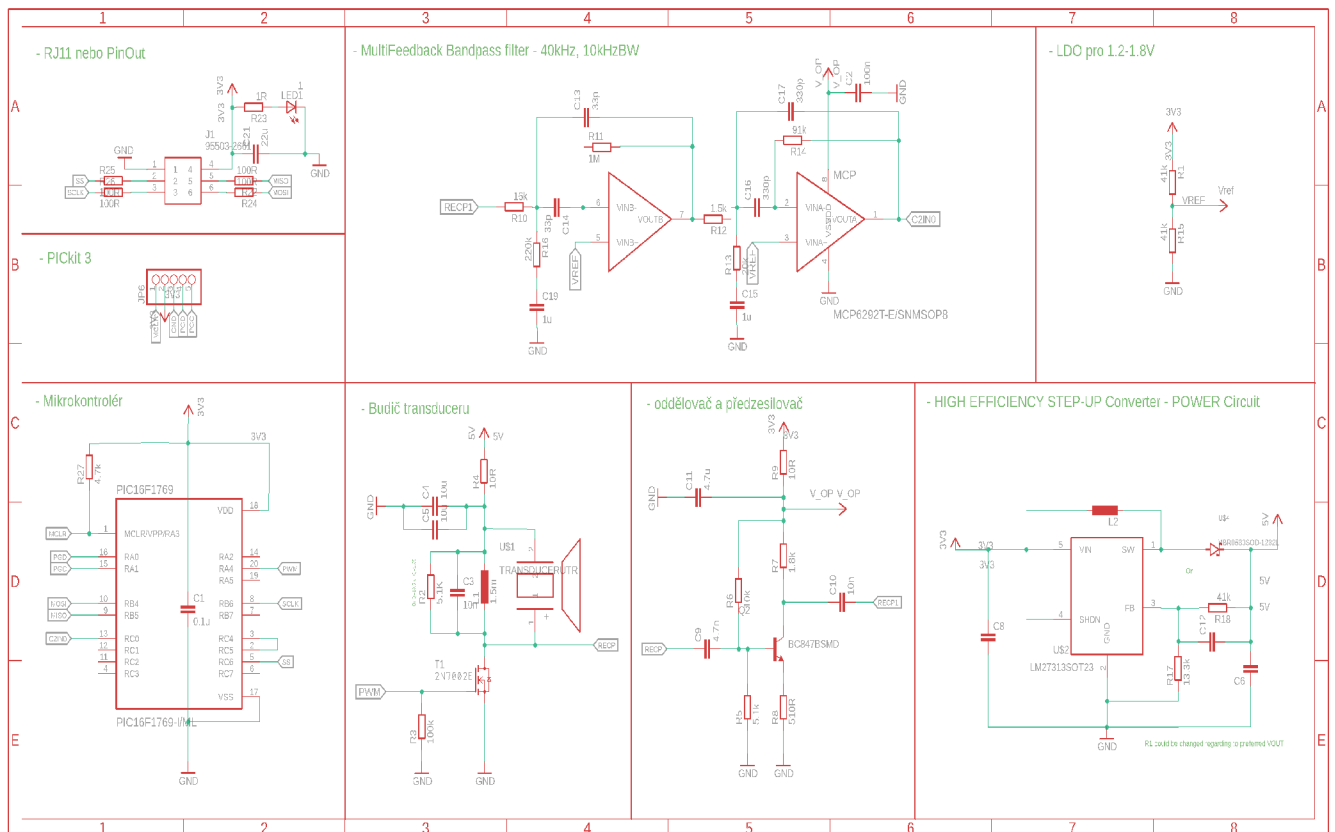
Pro toto měření jsem využil osciloskopu, který je připojen na vysílací signál vysílače a druhou sondou na signál výstupu transduceru. Poté se na osciloskopu nastaví trigger na přijatý signál a vyladí se měřicí systém tak, aby bylo snímání správné a s co nejmenším rušením okolí. Poté se data zaznamenají a porovnají s metrem naměřenou vzdáleností. Tím se zároveň ozkouší použití sensoru jako mikrofonu a reproduktoru.



Obrázek 4.8: Základní struktura programu pro Vysílač a Přijímač.

4.0.6 Obvod a DPS pro 3. cíl

V prostředí pro návrh obvodů Eagle je navrženo schéma a deska s budícím, zesilovacím a napěťovým obvodem. DPS zahrnuje PIC16F1769, RLC budící obvod, zvyšující měnič, oddělovací/předzesilovací obvod a zesilovací obvod. Zvyšující měnič má zvýšit napětí 3,3 V na 5 V a dodávat toto napětí do budícího obvodu.

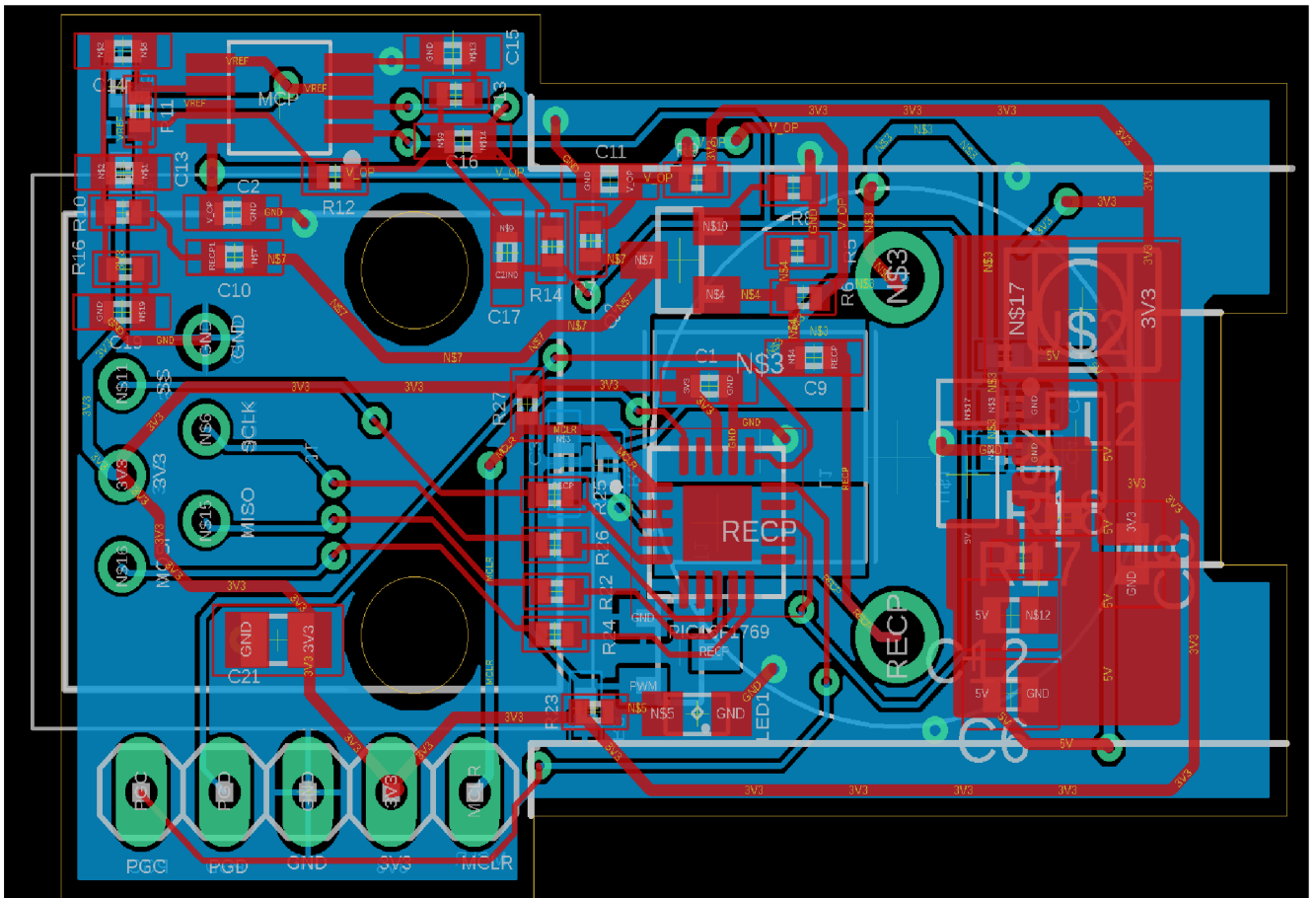


Obrázek 4.9: Schématický návrh DPS pro 3. cíl.

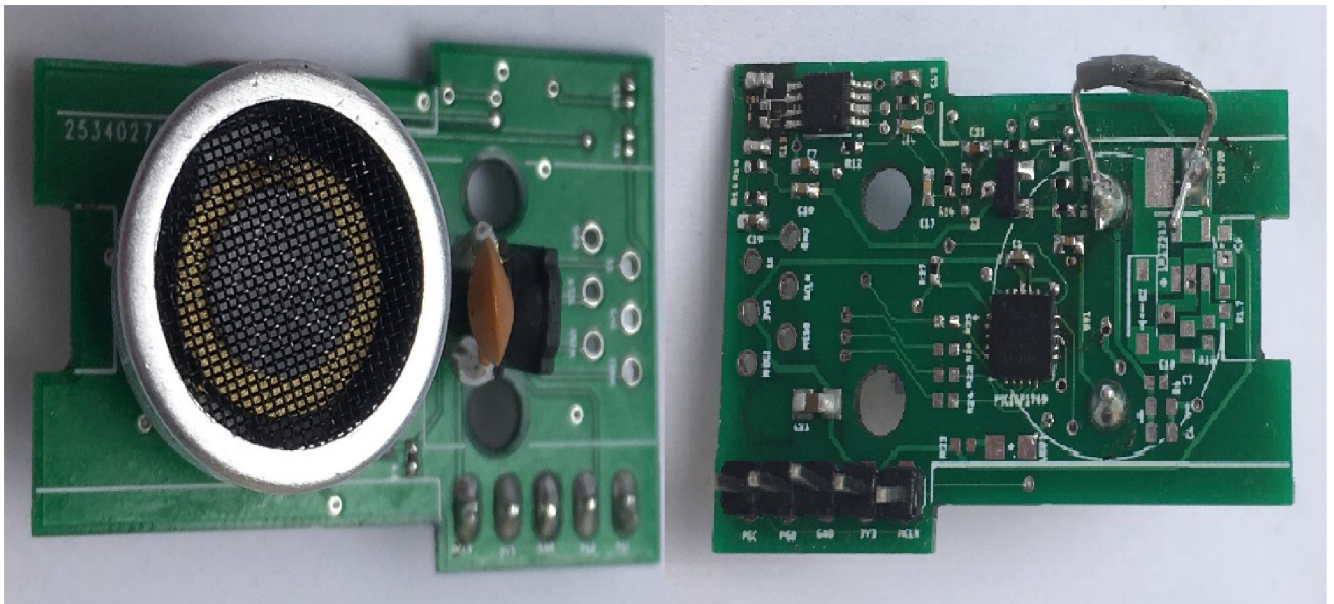
Při návrhu a testování různých obvodů finálního prototypu DPS objevila řada problémů, o problémech se zesilováním bude pojednáno v podkapitole 4.3 na straně 46. Zde je uvedeno, že problém nastal s měničem zvyšujícím napětí. Měnič byl podroben různým testům a variacím návrhu na DPS. Bylo s ním vyzkoušeno několik zátěží, pro žádaný proud. Stability obvodu nebylo docíleno². Cívka se buď přesitila a přestala kmitat nebo se naopak neseptal vnitřní MOS-FET měniče. Proto je na obrázku 4.11 vidět přepájený drát z 3,3 V na napájení transduceru, aby bylo možné otestovat další práci zesilovacího obvodu.

²viz Příloha č.3 a č.4 Záznam měniče z osciloskopu

4 POSTUP ŘEŠENÍ A VÝSLEDKY



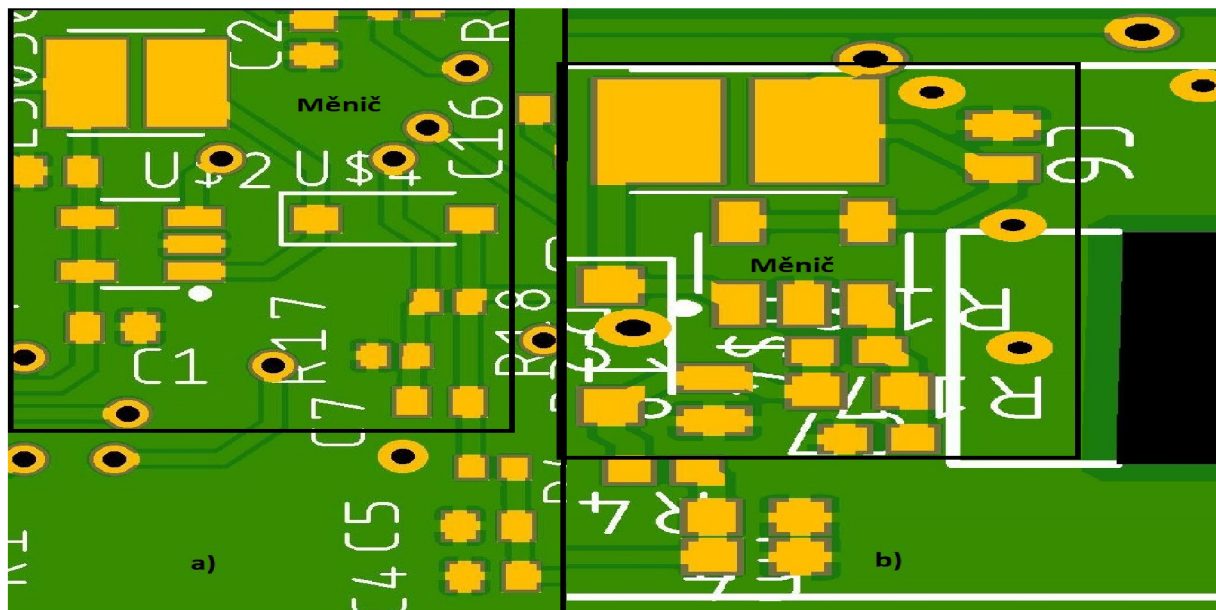
Obrázek 4.10: Návrh DPS pro 4. cíl.



Obrázek 4.11: DPS pro cíl 4.

4.0.7 Testování měniče zvyšujícího napětí

Při návrhu DPS je jako jeden z hlavních faktorů podmínka přívodního napětí 3,3 V. Jelikož je žádoucí, aby bylo možné si operativně zvolit budící napětí, tak aby na transduceru bylo pro otevřené pouzdro $U = 20 V_{pp}$ nebo pro uzavřené pouzdro běžně U je 80 – 150 V_{pp} , je potřeba splnit tento požadavek implementací obvodu zvyšujícího napětí. Minimální budící napětí pro „UTR-1640K-TT-2-R“ s $U = 20 V_{pp}$ z tabulky 4.1 je 5V. Ve schématu na obrázku 4.5 je lineární regulátor, který reguluje napětí 5 V na 3,3 V. To nesplňuje požadavky na návrh DPS z podkapitoly 2.2.2, kde je stanoveno, že napájecí napětí je 3,3 V. Proto je pro zvýšení napětí je zvolen „Step-up“ měnič s velkým kmitočtem, který by díky tomu měl nabídnout kompaktnější rozměry cívky. Použitý „Step-up“ je obvod od firmy Texas Instruments LM27313 [25].

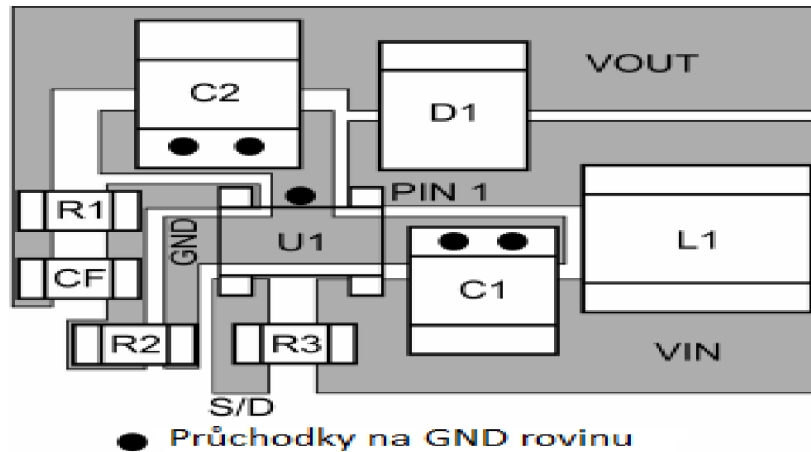


Obrázek 4.12: Obvod měniče na a)1. a b)2. verzi DPS.

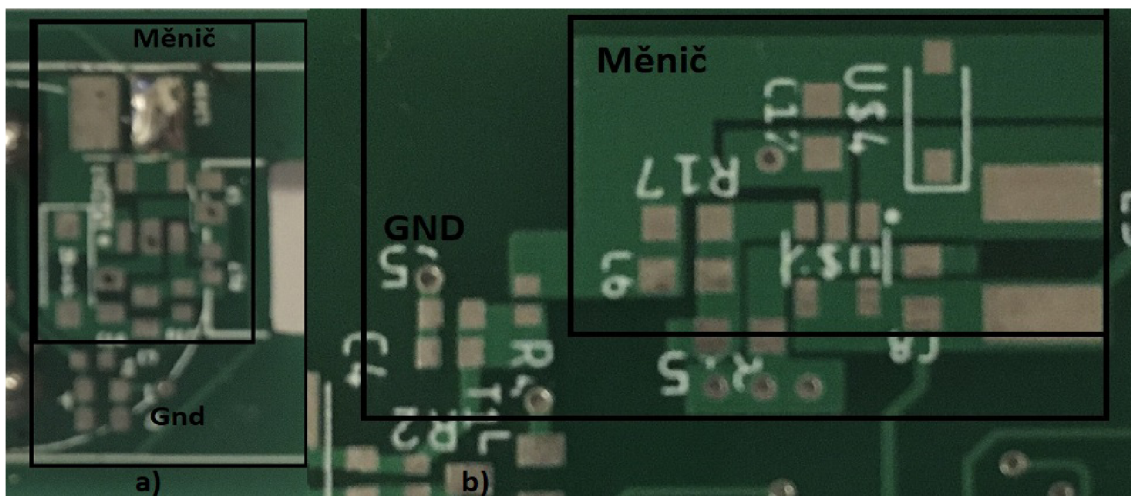
První provedení obvodu měniče z obrázku 4.9 je na obrázku 4.12a,. Toto provedení je první verzí, která pracovala nestabilně a neustále se napětí snižovalo anebo se chovalo chaoticky³. První úvaha byla, že se zařízení přehřívá a neudrží si požadované podmínky pro správnou funkcionalitu, proto je navržena druhá DPS, s jiným uspořádáním komponent. Komponenty jsou blíže u sebe a jsou kompaktněji uspořádány. To je vidět na obrázku 4.12b. I toto druhé provedení opakovalo nestabilitu první DPS. Další, třetí úvaha byla, že cesty pro napětí a signály obvodu měniče jsou nesprávně rozmístěny a nerespektují proto omezení měniče. V důsledku toho dochází k přehřívání, zvětšení zvlnění proudu, napětí a přesycení cívky. V technické dokumentaci měniče [25] je doporučení, které určuje rozmístění konkrétních komponent a rozměry cest pro vstupní a výstupní napětí, zem a spínací napětí měniče. Doporučení je zobrazeno na obrázku 4.13 převzatého z [25]. Provedení obvodu doporučeného výrobcem měniče bylo realizováno dvakrát. Při druhé realizaci DPS jsou cesty rozměrnější než u předchozí varianty. Tato změna je vidět na obrázku 4.14.

³Při nedostatečném odběru proudu ze zátěže, se nesepe vnitřní MOS-FET měniče a naopak při příliš velkém odběru se měnič přehřívá a snaží se dodat co největší proud, při kterém se zařízení přehřeje přestane fungovat nebo se zničí.

4 POSTUP ŘEŠENÍ A VÝSLEDKY



Obrázek 4.13: Doporučené rozložení na DPS [25]



Obrázek 4.14: Finální obvody měniče a) 1. verze b) 2. verze

Následující čtvrté provedení v pořadí nestabilitu obvodu⁴ nevyřešilo. Další pátý postup byl, dát do zátěže měniče takový odpor, který by měl podobný odběr proudu jako RLC budící obvod, který měl maximálně několik jednotek mA. Pro výstupní napětí měniče 5V platí Ohmův zákon $R = U/I = 5/0.001 = 5000 \Omega$. Tento odpor byl zapojen do zátěže mezi výstupní napětí a zem obvodu. Na obrázku je zem 4.14 označena GND. Toto zapojení vykazuje stejný problém a to neseprnutý vnitřní MOS-FET měniče, což znamená 0 V napětí na výstupu. Pro vyzkoušení největší efektivity měniče musí být za zátěž zapojen takový odpor, který zaručí nejefektivnější pracovní proud měniče. Dle datasheetu⁵ je měnič nejefektivnější pro 5 V výstupního napětí, když je výstupní proud 100 mA. Proto je v zátěži odpor roven $R = U/I = 5/0.1 = 50 \Omega$. I přes tuto konfiguraci, měnič vykazoval neustále stejnou nestabilitu⁶ a nepracoval spolehlivě, tedy není možné pro další zkoumání sensoru využít měniče a pokračovat bez zvyšovače napětí.

⁴Příloha č.3 a č.4 Záznam měniče z osciloskopu.

⁵Kde je na obrázku 8 grav vyobrazující účinnost měniče ku výstupnímu proudu měniče a pro různá výstupní napětí.

⁶Jak bylo popsáno v předchozím odstavci, výstupní napětí se udrželo na požadované hodnotě jen několik málo minut a poté kleslo na 0 V. To lze také pozorovat v příloze č.5 a č.6.

4.1 Cíl druhý

V tomto cíli bylo provedeno měření vzdálenosti pomocí dvou monostatických transducerů. Odečtené a vypočítané hodnoty jsou zaneseny do tabulky 4.1. Je patrné, že měřením⁷ pomocí této metody můžeme v celku přesně⁸ snímat vzdálenost, a to až ke vzájemnému kontaktu snímačů.

4.1.1 Měření vzdálenosti

Na obrázku 4.5 je sestava pro měření vzdálenosti prvního cíle. Dle sestavy na obrázku níže jsou data měřena po pěti centimetrech až po vzdálenost čtyřicet centimetrů od zařízení. Pro přesnější měření bylo důležité změřit vzdálenost v okamžiku, kdy jsou zařízení položena přímo vedle sebe. V tom okamžiku, při kterém dochází k prodlevě přechodu vlny z zařízení-vzduch-zařízení a k fázovému posuvu. Hodnotu obdrženu při této korekční metodě vždy odečteme od následující vzdálenosti, které by pak mělo odpovídat vzdálenosti na měřidlu vedle zařízení. Nepřesnost je samozřejmě dána i nedokonalým postavením a umístěním zařízení mezi sebou a vůči metru. Chybovost měření se pak vyskytuje v řádech milimetrů. Zároveň má vliv na odečtení doby letu z osciloskopu i zvlnění signálu a proto může být ozvěna signálu méně zřetelná a přijatý signál je těžce rozeznatelný.



Obrázek 4.15: Měřicí soustava pro 2. cíl

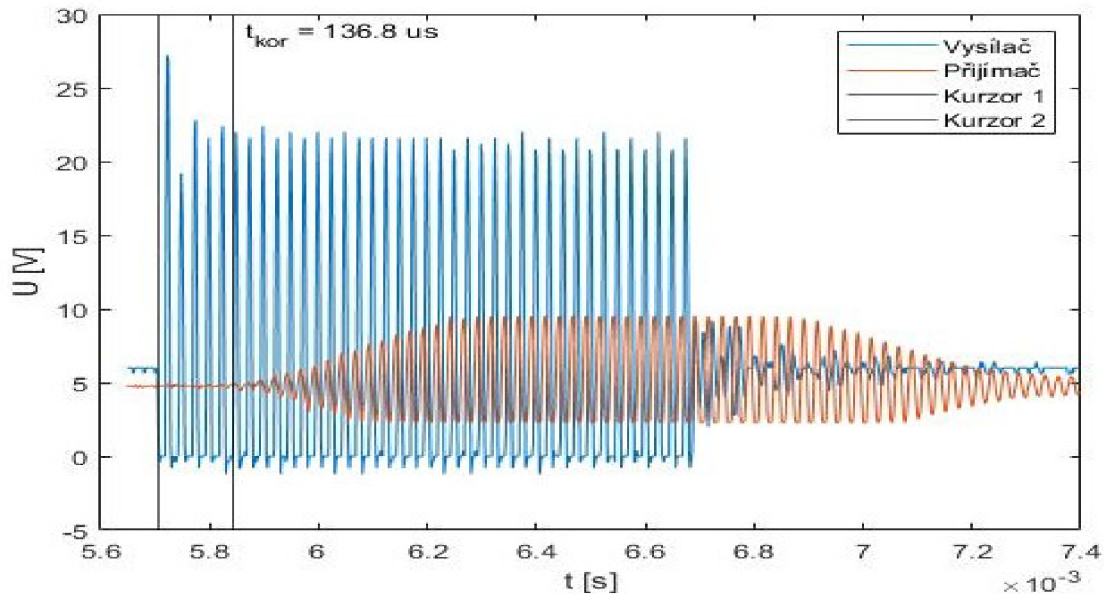
⁷jak je v tabulce 4.1.

⁸podle tabulky 4.1 $\pm 3\%$

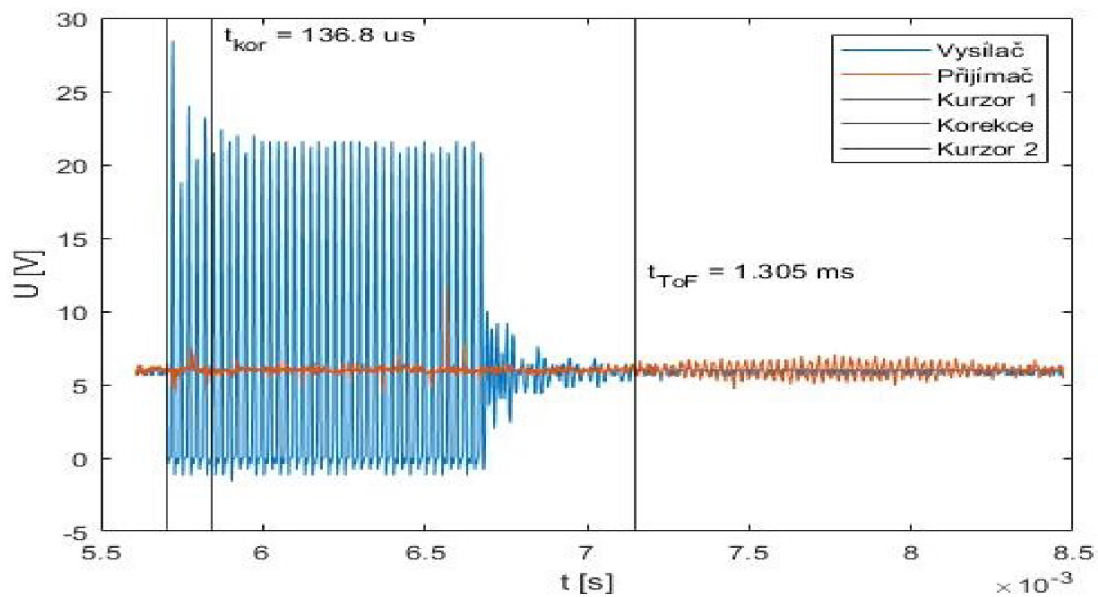
Vztah pro výpočet vzdálenosti pro měření s dvěma monostatickými transducery, kde je jeden přijímač a druhý vysílač. Vlna cestuje pouze jednou vzdáleností a proto se vztah pro vzdálenost 2.12 a s zohledněním korekční vzdálenosti:

$$d = (t_{ToF} - t_{kor}) \cdot c [m], \quad (4.2)$$

kde t_{ToF} [s] je doba letu y osciloskopu, t_{kor} [s] je doba letu pro korekční vzdálenost 0 centimetrů a c je rychlost zvuku. Zde je rychlost zvuku $c = 343 \text{ m/s}$ pro teplotu okolí 20°C .



Obrázek 4.16: Korekční vzdálenost 0 cm.



Obrázek 4.17: Vzdálenost 40 cm.

4.1.2 Tabulka naměřených hodnot

Teoretická vzdálenost d_{teo} [m]	Doba letu z osciloskopu t_{ToF} [s]	Korekční doba letu t_{kor} [s]	Vypočtená vzdálenost d [m]
0	$136,8 \cdot 10^{-6}$	$136,8 \cdot 10^{-6}$	0
0,05	$277,2 \cdot 10^{-6}$	$136,8 \cdot 10^{-6}$	0,048
0,1	$438,6 \cdot 10^{-6}$	$136,8 \cdot 10^{-6}$	0,103
0,15	$586 \cdot 10^{-6}$	$136,8 \cdot 10^{-6}$	0,154
0,20	$719,3 \cdot 10^{-6}$	$136,8 \cdot 10^{-6}$	0,199
0,25	$887,7 \cdot 10^{-6}$	$136,8 \cdot 10^{-6}$	0,257
0,30	$1,025 \cdot 10^{-3}$	$136,8 \cdot 10^{-6}$	0,304
0,35	$1,189 \cdot 10^{-3}$	$136,8 \cdot 10^{-6}$	0,361
0,40	$1,305 \cdot 10^{-3}$	$136,8 \cdot 10^{-6}$	0,40

Tabulka 4.1: Naměřená data pro samostatný vysílač a přijímač

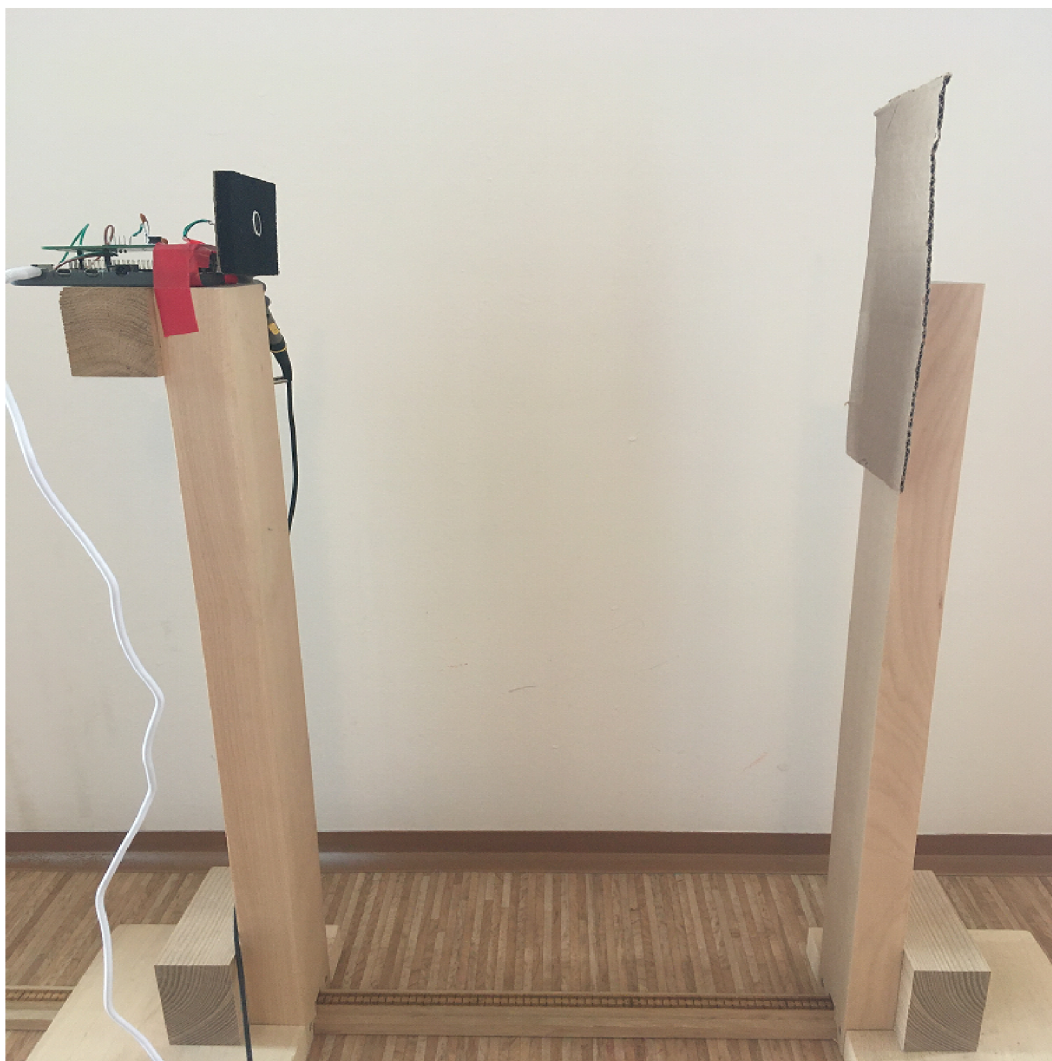
Z dat uvedených v tabulce vyplývá, že při konfiguraci dvou monostatických sensorů lze měřit vzdálenost mezi sensory od 0 centimetrů po jejich maximální dosah. Z měření vyplývá, že pokud by se měřilo v konfiguraci samostatného monostatického snímače, jak je v cíli 3 4.2 na straně 43, je snímané vzdálenosti omezeno dobou od začátku buzení po poslední vlnu rozpadu, kterou zesilovač zesílí, nad požadovanou rozhodovací úroveň, jak lze vidět na obrázku 4.2, jelikož se ozvěna ztratí v budícím signálu, pokud je překážka moc blízko. Problém příjmu zpětně odražené vlny pro monostatickou konfiguraci bude zkoumán v cíli 3.

4.2 Cíl třetí

V cíli 3 je měření provedeno pomocí jednoho monostatického transduceru, který snímá vzdálenost od překážky. Hodnoty doby letu se odečtou z osciloskopu a vypočte se vzdálenost. Doba letu a vzdálenost je zanesena do tabulky 4.2. Monostatický transducer, který se chová jako vysílač a přijímač. Tato metoda je však omezena tím, že odražená ozvěna se do určité vzdálenosti ztrácí v samotném budícím signálu.

4.2.1 Měření vzdálenosti

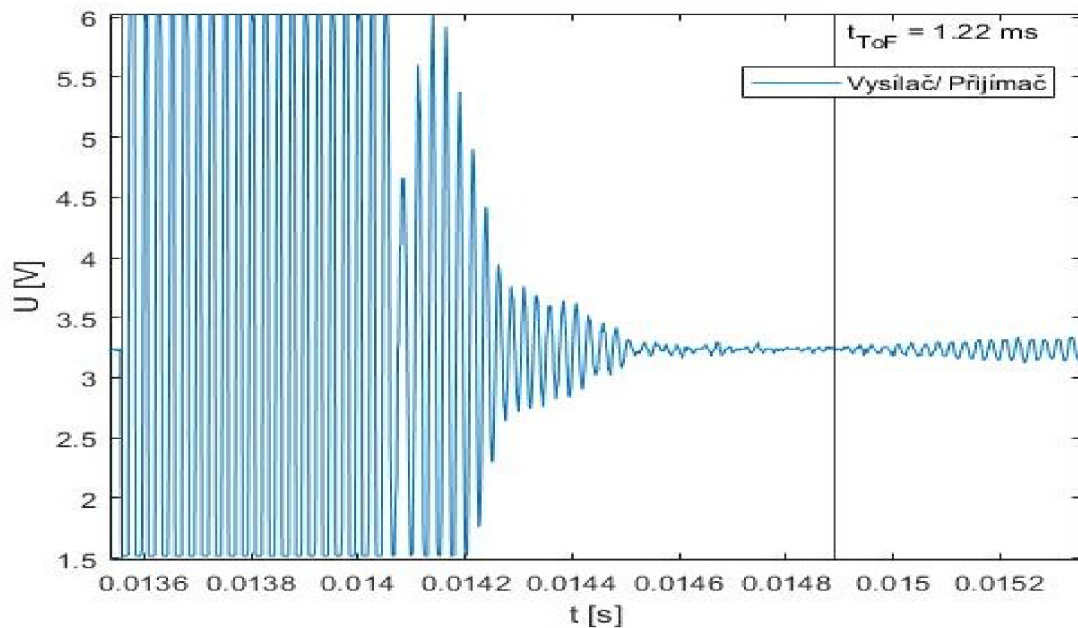
Obrázek 4.8 znázorňuje sestavu pro měření vzdálenosti samostatného piezoelektrického snímače. Vzdálenost se měří po pěti centimetrech, oddalováním překážky od měřidla. Vlna, kterou vyše sensor, putuje vzduchem, po nárazu na překážku se vlna odrazí zpět, některá část do okolí a jiné putují překážkou dál. Odražená vlna míří zpět do piezoelektrického transduceru a způsobí na něm tlak, který se díky piezoelektrickému efektu 2.1.5 přemění na elektrické napětí a vyvolá rozkmit odpovídající vyslané vlně akorát několikanásobně slabší. Napětí na sensoru je přímo úměrné tlaku a vzdálenosti podle vztahu 2.6 na straně 13.



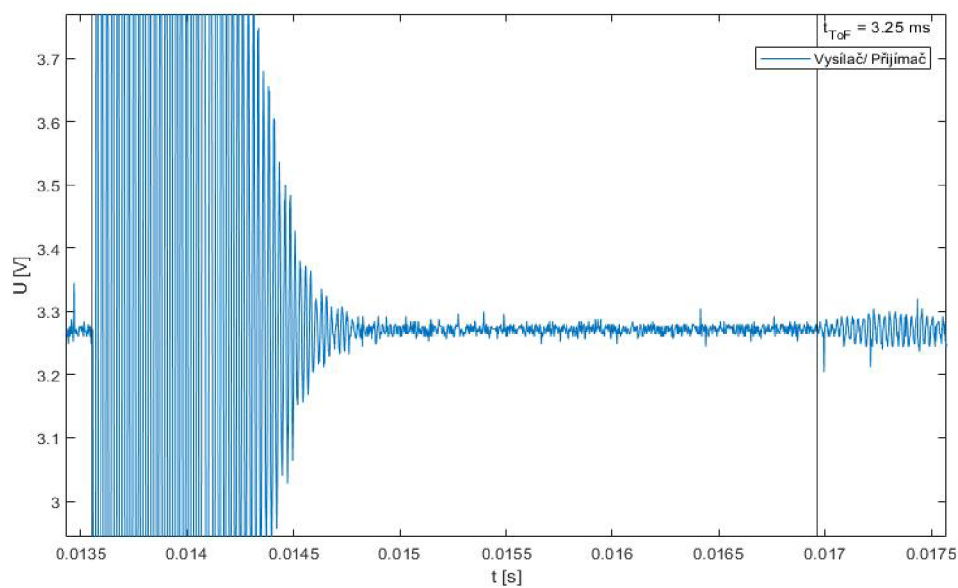
Obrázek 4.18: Měřící soustava pro 3. cíl

Vztah pro výpočet vzdálenosti v konfiguraci s jedním monostatickým transducerem, který funguje jako přijímač a vysílač. Vlna cestuje dvakrát stejnou vzdáleností a proto se použije vztah 2.12. Daný vztah:

$$d = \frac{t_{ToF} \cdot c}{2} [m], \quad (4.3)$$



Obrázek 4.19: Vzdálenost 20cm.



Obrázek 4.20: Vzdálenost 55cm.

4.2.2 Tabulka naměřených hodnot

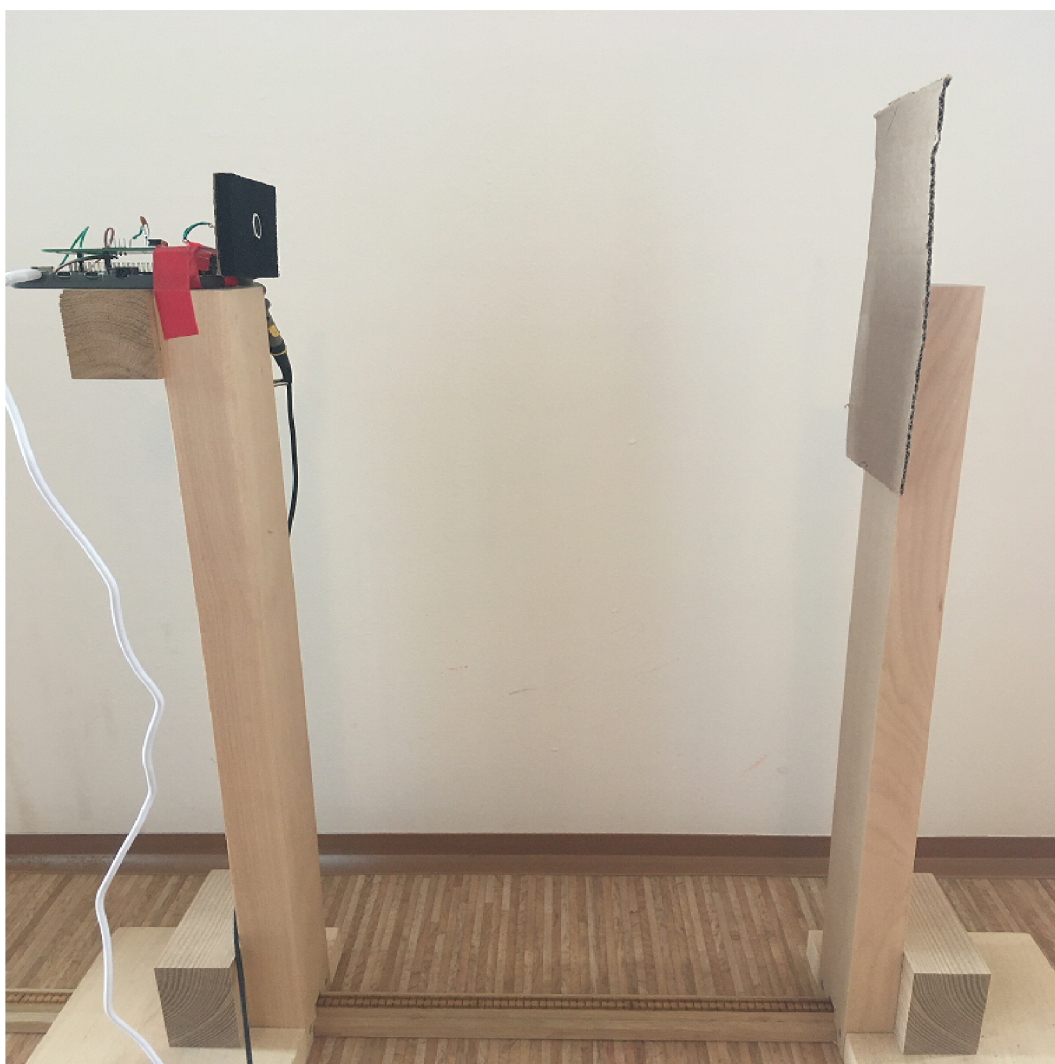
Naměřené hodnoty jsou v tabulce 4.2. V tabulce 4.2 jsou vidět hodnoty, které byly odečteny z osciloskopu. Vzdálenost překážky d je na základě těchto hodnot vypočtena. Rozdíl mezi teoretickými hodnotami je velký, jelikož reálná vzdálenost může být větší nežli teoretická, díky nepřesné kolmosti měřicí soustavy a nastavení sensoru je reálná vzdálenost jiná, než na metru mezi nohamama soustavy. Jak je vidět na obrázku 4.18 výše. byly odečteny z osciloskopu a následně byla vypočtena vzdálenost. Teoretická vzdálenost

Teoretická doba letu t_{ToF}^{teo} [s]	Teoretická vzdálenost d_{teo} [m]	Doba letu z osciloskopu t_{ToF} [s]	Vypočtená vzdálenost d [m]
$0,875 \cdot 10^{-3}$	0,15	$0,98 \cdot 10^{-3}$	0,168
$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,20	$1,22 \cdot 10^{-3}$	0,209
$1,45 \cdot 10^{-3}$	0,25	$1,52 \cdot 10^{-3}$	0,261
$1,75 \cdot 10^{-3}$	0,30	$1,77 \cdot 10^{-3}$	0,304
$2,04 \cdot 10^{-3}$	0,35	$2,06 \cdot 10^{-3}$	0,353
$2,33 \cdot 10^{-3}$	0,40	$2,34 \cdot 10^{-3}$	0,401
$2,62 \cdot 10^{-3}$	0,45	$2,65 \cdot 10^{-3}$	0,454
$2,92 \cdot 10^{-3}$	0,50	$2,94 \cdot 10^{-3}$	0,504
$3,21 \cdot 10^{-3}$	0,55	$3,25 \cdot 10^{-3}$	0,557
$3,50 \cdot 10^{-3}$	0,60	$3,53 \cdot 10^{-3}$	0,605
$3,79 \cdot 10^{-3}$	0,65	$3,83 \cdot 10^{-3}$	0,657
$4,08 \cdot 10^{-3}$	0,70	$4,11 \cdot 10^{-3}$	0,705
$4,37 \cdot 10^{-3}$	0,75	$4,38 \cdot 10^{-3}$	0,751
$4,66 \cdot 10^{-3}$	0,80	$4,72 \cdot 10^{-3}$	0,809

Tabulka 4.2: Naměřená data pro samostatný transducer

4.3 Cíl čtvrtý

Měření vzdálenosti v cíli 4 bylo prováděno v podobné konfiguraci, jako u 3. cíle. Rozdíl je v tom, že se pomocí osciloskopu měřila část za zesilovačem a pak případně výstup z komparátoru mikrokontroléru PIC16F1769. Tato sestava není přesně kalibrovaná a rozdíl mezi vzdálenosti noh na vrchu a ve spodu noh, kde je metr, je centimetr až několik milimetrů. Vliv na to má i přesná pozice transduceru s hranou nohy.

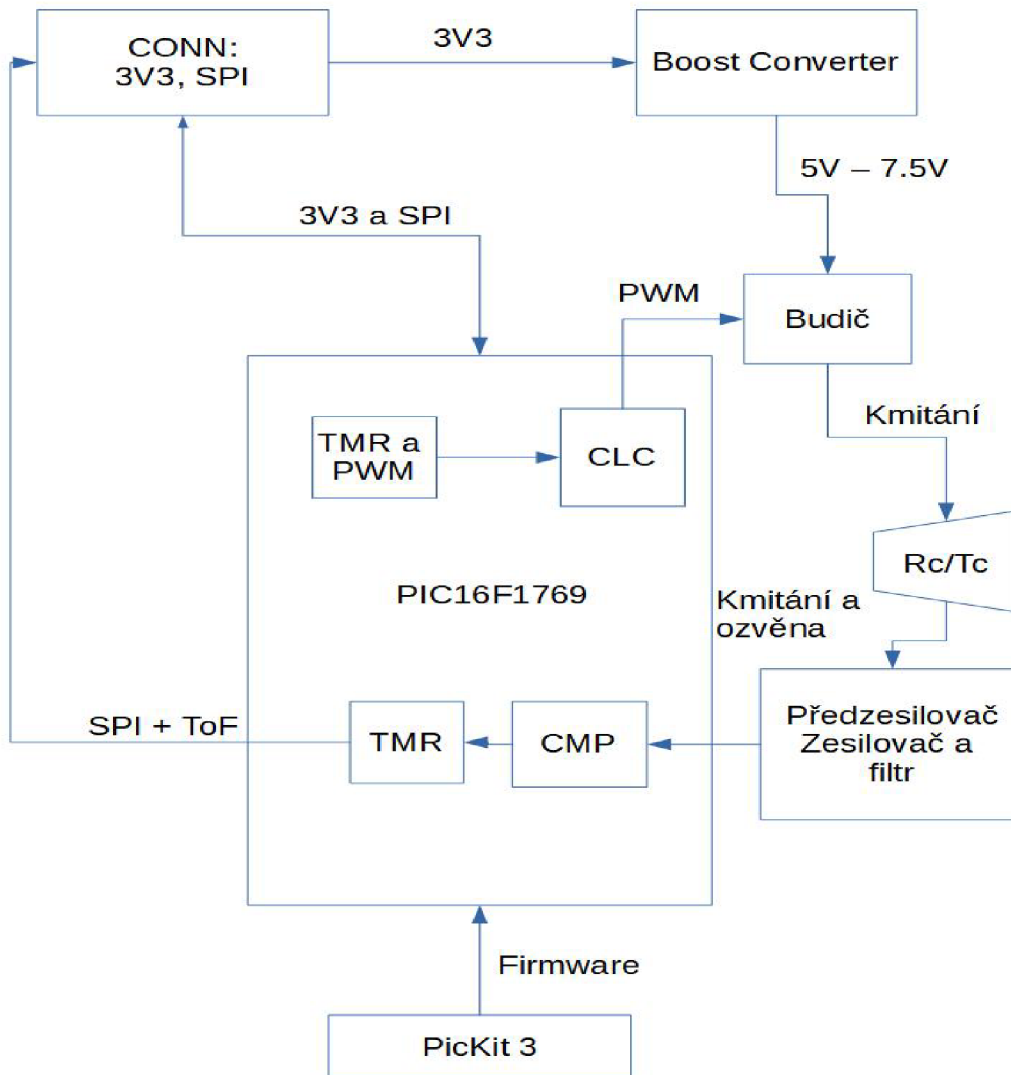


Obrázek 4.21: Měřící soustava pro 4. cíl

4.3.1 Bloková reprezentace modulu pro 4. cíl

Pro měření vzdálenosti odražené ozvěny je potřeba signál zesílit, přijímat na vstupu komparátoru mikrokontroléru a vyhodnotit dobu mezi budícím a odraženým signálem jako dobu letu vlny. Tato hodnota je pak vyslána po sběrnici SPI do zařízení. Výsledně by měl firmware vyslat budící sekvenci pokaždé, kdy přijde z výukové platformy podnět a následně odeslat vyhodnocená data po SPI zpět.

Na obrázku 4.22 lze vidět funkční schéma firmwaru s elektronickými bloky zařízení. Lze zde vidět předpokládaný směr signálu a části po kterých se generuje, přijímá, zpracovává a



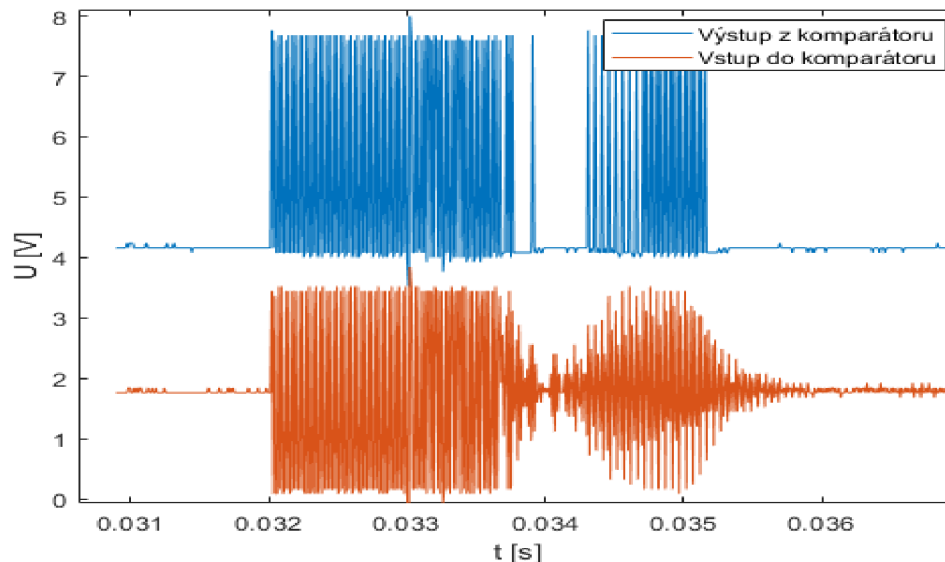
Obrázek 4.22: Struktura firmwaru pro 4. cíl.

odesílá výsledný údaj po sběrnici SPI. To je zamýšlená struktura zařízení pro buzení, snímání a vyhodnocování dat.

4.3.2 Testování a měření modulu

Po konstrukci modulu, který je vidět na obrázku 4.11 byl nahrán firmware, který nastaví vnitřní oscilátor, časovače, PWM modul, přerušeni, digitální modulátor signálu, logické buňky, komparátor a referenční hodnotu u komparátoru. Výstup komparátoru mikrokontroleru byl vyveden na výstupní pin jednoho z pinů pro SPI komunikaci tak, aby byl vidět signál vystupující z komparátoru, který by pak sloužil pro lepší nastavení firmwaru pro časování odchozí a příchozí ultrazvukové vlny. To lze vidět na obrázku 4.23. Poté by se časový údaj odeslal po sběrnici SPI. Tento proces by nastal vždy tak, že po odeslání spouštěcího bytu z master zařízení, by byla odeslána zpět hodnota, která by byla poslední zaznamenaná senzorem po předem stanoveném intervalu snímání polohy ve stavu nečinnosti master zařízení. Zároveň po přijetí spouštěcího podnětu z master zařízení ultrazvukový modul vyšle sérii budících pulsů a v následujícím cyklu

je odešle po sběrnici SPI. Tímto způsobem by bylo zajištěno snímání polohy i ve stavu nečinnosti a okamžité odeslání poslední známé polohy i při prvním obdržení signálu z master zařízení a tím by se zachoval princip SPI přenosu dat.

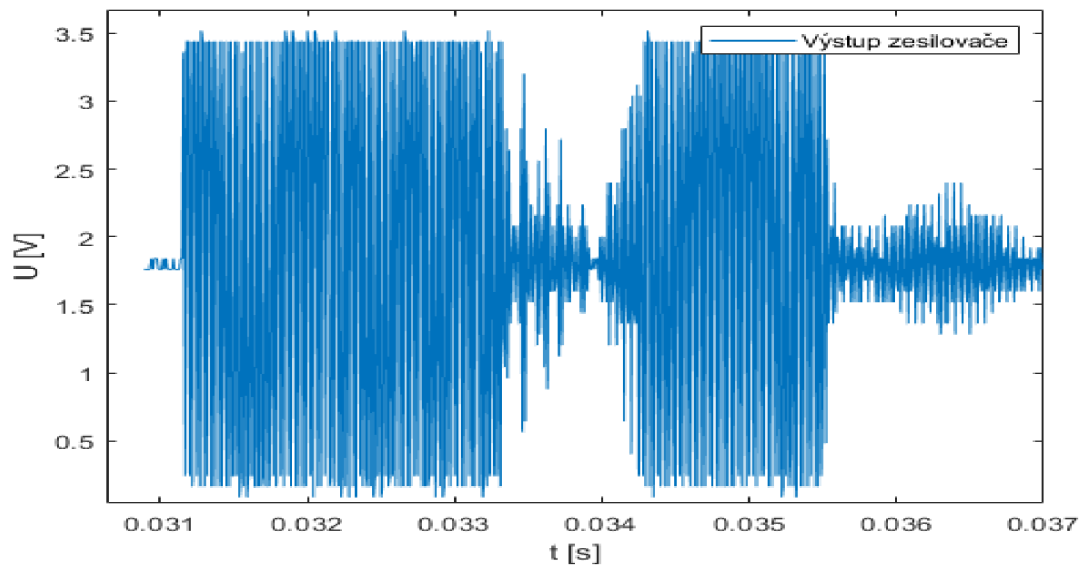


Obrázek 4.23: Výstup z komparátoru a vstup do komparátoru.

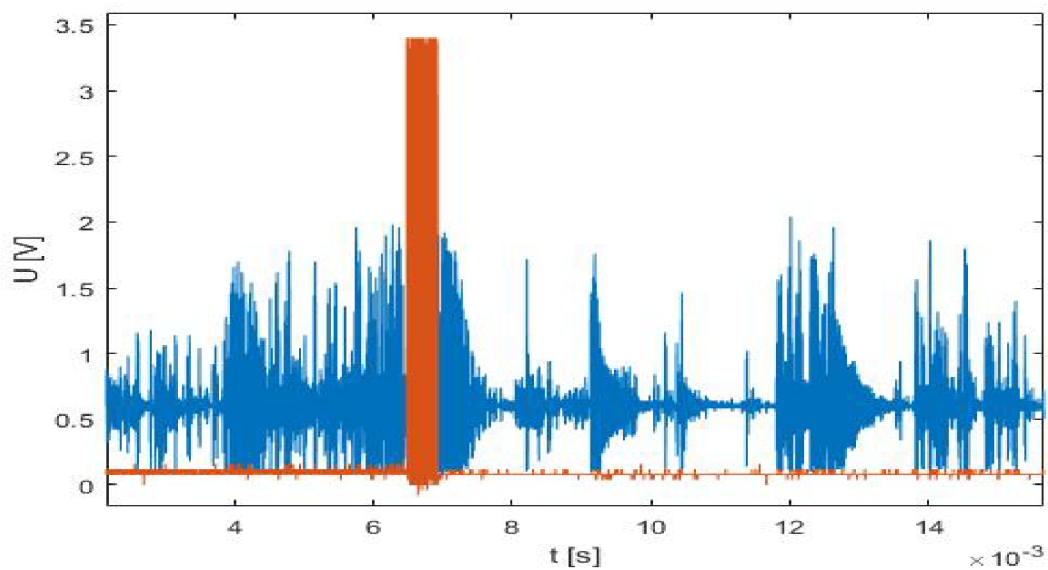
Na obrázku výše jde vidět výstup z komparátoru a vstup do komparátoru, ve chvíli kdy zařízení pracuje správně a žádný z obvodů neselhává. To je však možné jen pokud je vyslaný signál správně přijat, zpracován, zesílen a ve správnem stavu doručen na vstup komparátoru. Jelikož se v průběhu testování začali objevovat větší či menší problémy v obvodu a tedy i nesprávné zpracování signálu na vstup komparátoru, nebylo možné dále správně naprogramovat časování signálu a odesílání dat po sběrnici SPI. Správná funkce zařízení vedoucí k bezproblémovému zpracování signálu je na obrázku 4.23. To však šlo vyhodnocovat jen po dobu několika minut. Následně obvod přestal správně fungovat a vykazoval podobné chování, jako je na obrázku 4.25. Toto chování může být zapříčiněno špatně nastaveným obvodem operačního zesilovače, kde se po určité chvíli zesilovací obvod rozkmitá a začne vykazovat nestabilní chování anebo je při použití pouzdra QFN mikrokontroleru PIC16F1769, špatně zajistitelné správné spojení pinů kontroleru s ploškami spojů na DPS.

Vstup do komparátoru ze zesilovače lze vidět na obrázku 4.24. Zde je vidět stabilní zesílení, než se začne projevovat nestabilita, jako je na obrázku 4.25, kde je výstup ze zesilovače a výstup z generátoru PWM pro zjištění místa problému. Tím bylo zapříčiněno, že nemohlo být provedeno naprogramování časovacího úseku sensoru. Výstup z komparátoru byl nesouvýslý a nezpracovatelný, jelikož vstup do komparátoru vypadá jak je na obrázku 4.25. Další článek, který nesprávně fungoval, byl měnič zvyšující napětí, který nebyl schopný si udržet zvýšené napětí po delší dobu a vykazoval různá labilní chování⁹. Proto bylo provedeno několik změn v návrzích obvodu tohoto měniče. Ani po pátem zkonstruování stejně nefungoval spolehlivě. Proto bylo nutné napájet transducer 3,3 V, aby bylo možné provést alespoň nějaká měření a pokusy se zbytkem obvodu u kterého se projevila problém se zesilovačem a pouzdrém kontroleru, která byla popsána výše.

⁹Příloha č.3 a č.4 Záznam měniče z osciloskopu



Obrázek 4.24: Výstup ze zesilovače.



Obrázek 4.25: Výstup ze zesilovače a budící PWM.

Na obrázku 4.25 lze vidět, že operační zesilovač osciluje při stabilním spínacím signálu budiče z mikrokontroléru. Z toho plyne, že je potřeba se zaměřit na lepší zesilovací stupeň zařízení a stabilitu budícího obvodu.

5 Závěr

V rešerši této práce bylo zapotřebí provést zpracování principu ultrazvuku a šíření vln ve vzduchu. V první části rešerše jsou uvedeny fyzikální vlastnosti zvuku a šíření vln ve vzduchu. V textu je popsán princip akustické intenzity, akustického tlumení, akustické impedance, piezoelektrický efekt a další. V podkapitole 2.1.6 je zmíněná konstrukce pouzdra, princip piezoelektrického snímače a příjmu signálu. V další části rešerše je uveden výčet dostupných ultrazvukových sensorů, které lze buď zakoupit, sestrojít nebo se s nimi setkat v průmyslu. Jsou zde uvedeny podmínky, které jsou kladeny na finální konstrukci zařízení. Popsány jsou dvě základní metody pro buzení a řízení piezoelektrického měniče. Dále je uveden výčet dostupných ultrazvukových logických obvodů, mikrokontrolér využívaný při práci ultrazvukovým senzorem a periférie mikrokontroléru.

V cílech řešení jsou upřesněny cíle práce a výčet piezoelektrických transducerů. Následně jsou uvedeny a rozepsány specifikace jednotlivých cílů s ohledem na konstrukce DPS.

V kapitole „Postup řešení a výsledky“ 4 je uveden a rozebrán použitý budicí obvod pro tvorbu prototypu. V následujících podsekcích jsou obvody znázorněny a simulovány ve SPICE simulátoru. V podkapitolách 4.0.4 a 4.0.6 je uveden návrh DPS a jeho fyzická konstrukce, která byla použita v experimentech cílů 2, 3 a 4. V cíli 2 je znázorněna měřicí soustava pro snímání vzdálenosti s prototypem DPS a grafy z měření pomocí osciloskopu. Uvedena je i tabulka naměřených hodnot, kde lze vidět nepřesnosti měření, která jsou způsobena nepřesným údajem rychlosti šíření zvuku v okolí, změnou teploty zařízení, vliv šumu a lidského faktoru při měření vzdálenosti metrem. Toto měření poslouží zároveň s druhým cílem, jako vyhodnocovací faktor pro další postup.

První obvod fungoval nesprávně, šlo o obvod měniče¹ zvýšení napětí. Obvod byl více jak čtyřikrát upraven a nakonec sestrojen přesně dle datasheetu [25] a k tomu byly vybrány odpovídající součástky, viz v podkapitola 4.0.7. V podkapitole 4.0.7 je popsáno, že vyšší napětí je potřeba pro obě topologie pouzdra transduceru. Pro dostatečný tlak odražené vlny ze vzdálenosti větší než je 80 cm je třeba většího budicího napětí než 3,3 V, které stačí pro snímání vzdálenosti do 80 cm transducerem s otevřeným typem pouzdra a maximálním budicím napětím $20V_{pp}$. Větší napětí jak 3,3 V je potřeba jak pro RLC obvod, tak i pro transformátorovou metodu, zmíněnou v rešeršní kapitole 2 na straně 24. Řešení a testování měniče zabralo několikrát² delší dobu, než bylo plánováno pro realizaci obvodu, proto bylo upuštěno od zvyšování napětí a bylo realizováno měření zesilovací části, kde napájecí napětí budicího obvodu je stejné jako napájecí napětí DPS 3,3 V. To způsobilo neideální³ velikost napětí „ V_{pp} “ a proto je tlak zpětně odražené ultrazvukové vlny dostatečný do 80 centimetru vzdálenosti od senzoru. Tato maximální vzdálenost není srovnatelná s zařízeními zmíněných v podkapitole 2.2.

¹Příloha č.3 a č.4 Záznam měniče z osciloskopu

²Předpokládaná doba byla 2 týdny od návrhu po výrobu, jelikož návrhu muselo vzniknout více jak 4, tak se ekvivalentně prodloužila doba řešení obvodu měniče.

³Ideální střídavé napětí na transduceru, je ovlivněno parametry udávané výrobcem senzoru. To je vidět v tabulce 4.1. V případě zde konstruovaného modulu, to je 15-20 V_{pp} .

V cíli 2 a 3 je podroben prototyp ovládacího obvodu transduceru měření, aby se zjistilo, jestli daný obvod je stabilní a zdali může sloužit pro další cíl. V cíli 4 je použita DPS z obrázku 4.11, na které je umístěn zesilovací obvod a původně zamýšlený měnič zvyšující napětí. Měření byla prováděna na stejné měřicí sestavě, která je na obrázku 4.21. Bohužel na finální DPS se vyskytlo hned několik problémů se zesilováním. Obvod na DPS byl schopný zesilovat signál několik minut nebo desítek sekund a poté začal operační zesilovač oscilovat, nebo disfunkci PWM výstupu, vlivem špatného spojení pinu a plošky. Správnou funkci zesilovače a komparátoru lze vidět na obrázku 4.23 a disfunkci znemožňující stabilitu lze vidět na obrázku 4.25.

Pro další práci se senzorem je důležité se zaměřit na napájecí část DPS. Nežli se začlení do návrhu DPS, je nutné zjistit závadu obvodu měniče a zkonstruovat funkční prototyp na nepájivém poli. Pokud by se spínaný měnič ukázal jako nesprávný přístup zvyšování napětí, lze využít nábojových pump. Z obrázku 4.24 lze vidět, že daný zesilovací obvod dokáže zesilovat účinně, ale na obrázku 4.25 je vidět, že jeho funkčnost není stabilní. Proto je potřeba prozkoumat další konfigurace zesilování signálu a pokusit se pro ušetření místa využít integrované operační zesilovače na mikrokontroléru PIC16F1769, který disponuje větším počtem periférií. Buzení signálu pomocí RLC obvodu na obrázku 2.21, je možné, jak ukazuje měření v cíli 2, 3 a 4. Ale jeho stabilita se v průběhu řešení cíle 4 ukázala jako problematická a za problémy s buzením mohla i přesycená cívka. Proto by bylo díky řešení cíle 3 a 4, které ukázalo funkci a možnosti řízení transduceru, přejít k využití transformátoru nebo „Half-bridge MOS-FET driveru“. Jelikož PIC16F1769 nabízí výstup dvou DSM, které mohou budit jak transformátor, tak „Half-bridge“. Přínosem této práce také bylo, že se dá PIC16F1769 dobře využít k řízení transduceru. Disponuje dostatečnými perifériemi a funkcemi, které jsou důležité pro výše zmíněné změny. Zároveň pro lepší manipulaci s PIC16F1769 je nutná změna pouzdra z QFN na typ SOIC, SSOP nebo TSSOP.

Seznam zkratek a symbolů

Zkratky

- BRD** Board
- CLC** Configurable logic cell
- DPS** Deska plošných spojů
- DSM** Digital signal modulator
- Eagle** Skriptovatelný program pro návrh DPS
- FSI** Fakulta strojního inženýrství
- MOS-FET** Metal–oxide–semiconductor field-effect transistor
- MCU** Microcontroller unit
- PZT** Oxid zirkoničitanu titaničitého
- PVDF** Polyvinyliden fluorid
- PIC** Programmable Intelligent Computer
- PWM** Pulse width modulator
- RLC** Rezistor (R), Induktor (L) a Kondenzátor (C)
- SCH** Schema
- SPI** Serial peripheral interface
- SPICE** Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
- SW** Software
- VUT** Vysoké učení technické

Symboly

Ω Odpor

C Kapacita

F Farad

H Henri

Hz Herz

L Cívka

P Výkon

p tlak

Pa Pascal

R Odpor

V_{pp} Volt peak-peak

V Volt

W Watt

Seznam obrázků

2.1	Vlnoplocha a paprsek [22].	11
2.2	Výpočet akustického pole a pístového emiteru [8].	12
2.3	Piezoelektrický princip křemíku [5].	13
2.4	Základní stavba piezoelektrického zařízení [5].	13
2.5	Základní piezoelektrická struktura [5].	14
2.6	Piezoelektrický Sensor	14
2.7	Schéma piezoelektrického rezonátoru a kmitočtová charakteristika [5].	15
2.8	Přijímač, vysílač a transducer [8].	16
2.9	Měřicí soustava, budící signál a ozvěna [5].	16
2.10	Varianty špatných ozvěn [18].	17
2.11	Správné snímání vzdálenosti [19].	18
2.12	Sensor HCSR04 [23].	19
2.13	Sensor JSN SR04t-2.0	20
2.14	Ultrasonic range finder AN1536 a AN2281 [20].	20
2.15	Core Independent Ultrasonic Distance Measurement AVR42779 [16].	21
2.16	TIDA-01386 Ultrasonic Distance Sensor[21].	21
2.17	Ultrazvukový sensor - Valeo	22
2.18	LEGO uložení pro DPS [32].	22
2.19	Výuková platforma jobst.io [32].	23
2.20	Transformátorová metoda[21].	24
2.21	Budič transduceru pomocí RLC.	25
2.22	Přímá metoda s ultrazvukovou řídicí jednotkou [29].	25
2.23	Mikrokontrolér PIC16F1769 v pouzdře QFN [30].	27
2.24	SPI přenos dat [30].	27
4.1	LTspice XVII model buzení transduceru.	31
4.2	LTspice XVII výstup modelu.	31
4.3	LTspice XVII model zesílení signálu.	32
4.4	LTspice XVII graf zesilovacího obvodu.	32
4.5	Schématický návrh DPS.	33
4.6	Návrh DPS.	34
4.7	DPS pro cíl 2 a 3.	34
4.8	Základní struktura programu pro Vysílač a Přijímač.	35
4.9	Schématický návrh DPS pro 3. cíl.	36
4.10	Návrh DPS pro 4. cíl.	37
4.11	DPS pro cíl 4.	37
4.12	Obvod měniče na a)1. a b)2. verzi DPS.	38
4.13	Doporučené rozložení na DPS [25].	39
4.14	Finální obvody měniče a) 1. verze b) 2. verze.	39
4.15	Měřicí soustava pro 2. cíl	40
4.16	Korekční vzdálenost 0 cm.	41
4.17	Vzdálenost 40 cm.	41
4.18	Měřicí soustava pro 3. cíl	43

4.19	Vzdálenost 20cm.	44
4.20	Vzdálenost 55cm.	44
4.21	Měřicí soustava pro 4. cíl	46
4.22	Struktura firmwaru pro 4. cíl.	47
4.23	Výstup z komparátoru a vstup do komparátoru.	48
4.24	Výstup ze zesilovače.	49
4.25	Výstup ze zesilovače a budící PWM.	49

Příloha

1. Příloha č.1 HCSR04 - minimální vzdálenost
2. Příloha č.2 JSN-SR04t-2.0 - minimální vzdálenost
3. Příloha č.3 Záznam měniče z osciloskopu - 1
4. Příloha č.4 Záznam měniče z osciloskopu - 2
5. Příloha č.5 Záznam z kolapsu zesilovače
6. Příloha č.6 Eagle
7. Příloha č.7 Simple charge pump simulation
8. Příloha č.8 Simulation_of_burst_and_amplifier_circuit
9. Příloha č.9 WFM
10. Příloha č.10 Matlab_CSV

Literatura

- [1] ERHART, J. *Piezoelectricity and ferroelectricity: Phenomena and properties* Department of Physics, Technical University of Liberec. Archived from the original on May 8, 2014 [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: https://moodle.fp.tul.cz/nano/pluginfile.php/2476/mod_resource/content/3/FPMpiezolecture1.pdf
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK, Jearl WALKER a Petr DUB. *Fyzika. Svazek 1. 2. přeprac. vyd.* Brno: VUTIUM, 2013, 1 sv. (různé stránkování) : obr., barev. fot., grafy. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [3] KAMINSKI, Piotr & Kaczmarek, Michał. (2014). *Floating ground - The path for conductive disturbances in active filter circuit*. Przegląd Elektrotechniczny. 90. 179-182. 10.12915/pe.2014.07.38.
- [4] KAZELLE, J. a kol. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*. Brno 2015. Elektronická skripta. VUT v Brně
- [5] NATHAN IDA. *Sensors, Actuators, and their Interfaces: A multidisciplinary introduction*. Institution Of Engineering & Technology (Iet), 2013.
- [6] NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA. *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada Publishing, 2005. ISBN 80-247-1152-4.
- [7] OTÁHAL, J. *Řídicí jednotka pro automobilové parkovací senzory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Vejlupek.
- [8] REGTIEN, Paul P.L. *Sensors for Mechatronics*. Elsevier Science, 2012. DOI: 10.1016/C2011-0-06204-X. ISBN 0123914973.
- [9] SINCLAIR IAN R. *Sound, Infrasound and Ultrasound*. Sensors and Transducers. 3rd Edition. Elsevier, 2001, s. 1-1. ISBN 9780750649322. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpSTE0001U/id:kt00C5J261/sensors-transducers-3rd/sound-infrasound-ultrasound?kpromoter=Summon>
- [10] SKALICKÝ, Jiří. *Teorie řízení 1. Vyd. 1.* Brno: Vysoké učení technické, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2112-6.
- [11] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o, 2002, 238 s. : il. ISBN 80-214-2037-5.
- [12] VALÁŠEK, Michael. *Mechatronika. Dot. 1. vyd.* Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01276-X.
- [13] VEJLUPEK, J. *Online identifikace parametrů přívěsu využitím ultrazvukových sensorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 94 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D..

- [14] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů. Vyd. 1.* Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03351-1.
- [15] *2N7002*. In: ON Semiconductor [online]. Aurora: ON Semiconductor, 2017 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.onsemi.cn/pub/Collateral/NDS7002A-D.PDF>
- [16] *AVR42779: Core Independent Ultrasonic Distance Measurement with ATtiny817*. In: Microchip [online]. Chandler: Microchip Technology, 2017 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001902A.pdf?fbclid=IwAR2m539lz0vTyuyxmBxp6CKjokQjn63Pml_upDXQnNRwC5adnz6z-XTZxOY
- [17] *Generating Ultrasound with Piezo Components*. PICeramic [online]. Lederhose: PI Ceramic, 2015 [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://www.piceramic.com/en/piezo-technology/generating-ultrasound-with-piezo-components/>
- [18] *Ineffective Ultrasonic Distance Measurement Situations*. In: Microchip [online]. San Jose: Atmel Corporation, 2016 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/atmel-42779-core-independent-ultrasonic-distance-measurement-with-attiny817_applicationnote_avr42779.pdf
- [19] *Ultrasonic Distance Measurement Principle*. In: Microchip [online]. San Jose: Atmel Corporation, 2016 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/atmel-42779-core-independent-ultrasonic-distance-measurement-with-attiny817_applicationnote_avr42779.pdf
- [20] CURTIS, Keith, Kristine SUMAGUE a Anthony STRAM. *AN2281 a AN1536 - Ultrasonic range and proximity detection*. In: Microchip [online]. Microchip Technology, 2017 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://circuitmaker.com/Projects/Details/CircuitMaker-Official/Ultrasonic-Range-Finder>
- [21] CAMPANELLA, GIOVANNI. *TIDA-01386 Ultrasonic Distance Sensor with IO-Link Reference Design*. [online]. In: . [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/tidudb2/tidudb2.pdf>
- [22] *Konstrukce ultrazvukového senzoru*. In: Murata Manufacturing [online]. Murata Manufacturing Co., b.r. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: https://corporate.murata.com/-/media/corporate/about/newsroom/techmag/metamorphosis17/productsmarket/ultrasonic/ultrasonic_mg0003.ashx?la=en
- [23] *HC-SR04*. In: SparkFun [online]. Niwot: SparkFun Electronics, b.r. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/parts/1/3/5/0/8/15569-Ultrasonic_Distance_Sensor_-_HC-SR04-01a.jpg
- [24] *JSN-SR04T-2.0*. In: Jahankit [online]. Teherán: Jahan Kit, b.r. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.jahankitshop.com/market/d/8946>
- [25] *LM27313/-Q1 1.6-MHz Boost Converter With 30-V Internal FET Switch in SOT-23*. In: Ti [online]. Dallas: Texas Instruments, 2015 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm27313-q1.pdf>
- [26] *MCP1703*. In: Microchip [online]. -: Microchip, 2011 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22049f.pdf>

- [27] *Ultrasonic Ranging Module HC-SR04*. In: SparkFun [online]. Niwot: elecfreaks, b.r. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>
- [28] *PGA460 Ultrasonic Module Hardware and Software Optimization*. In: Texas Instruments [online]. Dallas: Texas Instruments, 2017 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slaa732/slaa732.pdf?ts=1590336201942>
- [29] *PGA460 Ultrasonic Signal Processor and Transducer Driver*. In: Texas Instruments [online]. Dallas: Texas Instruments, 2019 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pga460.pdf?ts=1590391828156>
- [30] *PIC16(L)F1764/5/8/9*. In: Microchip [online]. -: Microchip, 2019 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC16LF1764-5-8-9-Data-Sheet-40001775E.pdf>
- [31] *PICkit3*. In: Microchip [online]. -: Microchip, 2013 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/52116A.pdf>
- [32] SPÁČIL, Tomáš, Vojtěch MLYNÁŘ a Martin APPEL. *Jobst.io Ultrasound*. In: Jobst.io [online]. Brno: jobst.io, 2019 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <http://jobst.io/wp-content/uploads/2019/10/1-768x681.png>
- [33] *Ultrasonic Sensing Basics*. In: Texas Instruments [online]. Dallas: Texas Instruments, 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slaa907c/slaa907c.pdf?ts=1590336194880>