

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



Bakalářská práce

Liberec 2013

Tomáš Šolc

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Konstrukce ultrazvukového senzoru vzdálenosti a
výukového modulu se senzory polohy

Construction of ultrasonic distance sensor and a training
module with position sensors.

Tomáš Šolc

Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektronické informační a řídicí systémy

Pracoviště: Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

Technická univerzita v Liberci
Studentská 2, 461 17 Liberec

Vedoucí práce: Ing. Jiří Jelínek Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Šolc**
Osobní číslo: **M10000115**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu: **Konstrukce ultrazvukového senzoru vzdálenosti a výukového modulu se senzory polohy**
Zadávající katedra: **Ústav řízení systémů a spolehlivosti**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

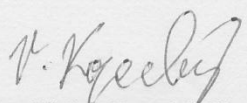
1. Seznamte se s problematikou senzorů vzdálenosti a nejčastějšími principy.
2. Navrhněte a realizujte vlastní ultrazvukový senzor včetně elektronických obvodů.
3. Navrhněte a realizujte přípravek s referenčním senzorem vzdálenosti a se senzory polohy, jejichž činnost a princip bude možné demonstrovat při výuce.
4. Realizovaná zařízení prakticky odzkoušejte.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

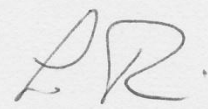
1. MAŠIKA, Pavel. Ultrazvukový dálkoměr. KTE magazín. 1997, 97, 5, s.
2. JEDLIČKA, Petr. Přehled obvodů řady CMOS 4000 - 2. díl, nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 1996-2005, ISBN 80-7300-168-3.
3. ĎAĎO, S; KREIDL, M. Měřicí převodníky fyzikálních veličin. Praha: Skriptum ČVUT FEL, 1990.
4. JELINEK, Jiří. Měření fyzikálních veličin. Liberec : Přednášky TUL, 2012.
5. KOLÁŘ, Milan. Analogová elektronika. Liberec : Přednášky TUL, 2012.
6. TKOTZ, Klaus , et al. Příručka pro elektrotechnika. 2. doplněné vydání. Praha : EUROPA-SOBOTÁLES, 2006. 623 s. ISBN 80-86706-13-3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.
Ústav řízení systémů a spolehlivosti
Konzultant bakalářské práce: Ing. Petr Fuchs
Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012
Termín odevzdání bakalářské práce: 17. května 2013


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Libor Tůma, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 15. října 2012

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 10. 5. 2013

Podpis

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Jelínkovi Ph. D. za jeho rady a pomoc při vytváření této Bakalářské práce.

Dále bych rád poděkovat své rodině za maximální podporu během mého studia.

Abstrakt

Konstrukce ultrazvukového senzoru vzdálenosti a výukového modulu se senzory polohy

Cílem bakalářské práce je navrhnout a zkonstruovat modul pro měření vzdálenosti, který se bude užívat jako názorný příklad ve výuce. Modul se skládá ze dvou částí. První část je tvořena návrhem a realizací přizpůsobovacích obvodu k senzorům, jejichž výstupy mají být připraveny pro měření osciloskopem. Druhým modulem je zde ovládání krokového motoru. Pohybem motoru dochází k posuvu měřítka. Senzory polohy měří vzdálenost k posuvnému měřítku přípravku. Bakalářská práce obsahuje řešerši o možnostech měření vzdálenosti, dále návrh a konstrukci přizpůsobovacího obvodu ultrazvukového, magnetostrikčního a indukčnostního senzoru polohy. Navržené senzory jsou porovnávány s odporovým senzorem polohy. V návrhu je i ovládání krokového motoru pomocí tlačítek. Všechna schémata s návrhy plošných spojů a program jsou v příloze na konci práce.

Klíčová slova: ultrazvukový, magnetostrikční, indukčnostní senzor polohy, krokový motor

Abstrakt

Construction of ultrasonic distance sensor and a training module with position sensors.

The aim of this work is to design and construct a module for distance measurement, which will be used as an illustrative example in teaching. The modul consists of two parts. The first part consists of the design and implementation of a matching circuit for sensors whose outputs have to be prepared for the oscilloscope. The second module is a control of the stepper motor. Moving the engine shifts the scales. Position sensors measure the distance to the sliding scale preparation. This bachelor thesis includes research about possibilities of measuring distance, design and construction of matching circuit of ultrasonic, magnetostrictive position sensor and induction sensor. The proposed sensors are compared to the resistive sensor of position. The proposal also contains a control of using the stepper motor. All the schemes with PCB design and the program are attached at the end of the work.

Keywords: ultrasonic, magnetostrictive, inductive position sensor, stepper motor

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
Úvod.....	13
1. Měření vzdálenosti	14
1.1. Kontaktní měření	14
1.1.1. Odporové senzory vzdálenosti.....	15
1.1.2. Magnetostrikční senzory vzdálenosti	16
1.1.3. Indukční transformátorové senzory vzdálenosti (LVDT)	18
1.1.4. Indukčnostní senzory vzdálenosti	19
1.2. Bezkontaktní měření vzdálenosti.....	19
1.2.1. Laserové, infračervené měření vzdálenosti.....	20
1.2.2. Ultrazvukové měření vzdálenosti	21
2. Návrh a realizace vlastního ultrazvukového senzoru vzdálenosti.....	22
2.1. Základní model senzoru	22
2.2. Ultrazvukové senzory přiblížení.....	22
2.3. Oscilátor - vysílací část ultrazvukového senzoru	24
2.3.1. Oscilátory	24
2.3.2. Přijímací část ultrazvukového senzoru.....	26
2.3.3. Shrnutí vlastností navrženého ultrazvukového senzoru	27
3. Návrh a realizace obvodů pro indukčnostní senzor vzdálenosti	28
3.1. Vlastnosti indukčnostního senzoru vzdálenosti a jeho fyzikální podstata	28
3.2. Model indukčnostního senzoru	29
3.3. Návrh měřicího zesilovače	30
3.4. Shrnutí vlastností navrženého obvodu	31

4. Návrh a realizace obvodů pro řízení krokového motoru	34
4.1. Krokové motory a jejich ovládání.....	34
4.2. Návrh řídicího obvodu s procesorem.....	35
4.3. Popis programu procesoru	36
4.4. Napájecí zdroj pro přípravek	37
Shrnutí	39
Závěr.....	40
Citovaná literatura.....	41

Seznam obrázků

Obrázek 1: Uspořádání lineárního odporového senzoru polohy	15
Obrázek 2: Základní struktura skrývající se pod krytem typického lankového snímače	16
Obrázek 3: a) lineární odporový senzor b) rotační lankový senzor	16
Obrázek 4: Princip magnetostrikčního měření vzdálenosti	17
Obrázek 5: Vnitřní zapojení LVDT senzoru	18
Obrázek 6: Obecný můstek	19
Obrázek 7: Princip bezkontaktního měření vzdálenosti	20
Obrázek 8: Závislost ultrazvuku na změně teploty okolí	21
Obrázek 9: Základní model senzoru	22
Obrázek 10: Směrová přijímací charakteristika přijímače	23
Obrázek 11: Směrová vyzařovací charakteristika vysílače	23
Obrázek 12: Obecný zpětnovazební oscilátor	24
Obrázek 13: Wienův článek	25
Obrázek 14: Wienův oscilátor s napěťovým slepovačem	25
Obrázek 15: Přizpůsobovací obvod ultrazvukového senzoru	26
Obrázek 16: Kompletní navržený obvod	27
Obrázek 17: Vnitřní schéma indukčnostního senzoru	28
Obrázek 18: Model indukčnostního senzoru	30
Obrázek 19: Celkové schéma indukčnostního senzoru	31
Obrázek 20: Výstupní charakteristika LVDT senzoru shodná s indukčnostním senzorem	32
Obrázek 21: Výstupní charakteristika indukčnostního senzoru posunutí	33
Obrázek 22: Schéma unipolárního řízení krokového motoru	34
Obrázek 23: Schéma bipolárního řízení	35
Obrázek 24: Rozložení cívek	35
Obrázek 25: Celkové schéma řídicího obvodu s procesorem	36
Obrázek 26: Navržený zdroj	38

Seznam tabulek

Tabulka 1 Závislost teploty a změny šíření ultrazvuku	21
Tabulka 2: Vlastnosti použitého senzoru	29
Tabulka 3:Naměřena data z indukčnostního senzoru posunutí	33
Tabulka 4: Druhy řízení s jejich spínací sekvencí jednotlivých cívek.....	36

Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a realizací přípravku se senzory polohy. Seznámíme se s měřením vzdálenosti metodami, které se používají v průmyslu. Měření provádím pomocí senzorů, u kterých se pohybuje jádro s pohybujícím se předmětem, tedy kontaktní. Nebo na bezkontaktní, u kterých využívám vlastnosti prostředí například měření pomocí ultrazvukových vln.

V práci se zabývám konstrukcí přizpůsobovacích obvodů pro jednotlivé senzory. Výstupy ze senzorů lze zobrazit na osciloskopu.

Motivace

Motivací mé práce byla vyrobit přípravek s názornou ukázkou funkce jednotlivých senzorů a nahradit stávající přípravek přípravkem novým, který bude sloužit pro výuku předmětu Měřící technika 2 Měření neelektrických veličin v učebně TK8 u pana Ing. Jelínka Ph.D.

Cíle práce

- Seznamte se s problematikou senzorů vzdálenosti a nejčastějšími principy.
- Navrhněte a realizujte vlastní ultrazvukový senzor včetně elektronických obvodů.
- Navrhněte a realizujte přípravek s referenčním senzorem vzdálenosti a se senzory polohy, jejichž činnost a princip bude možné demonstrovat při výuce.
- Realizovaná zařízení prakticky odzkoušejte.

1. Měření vzdálenosti

Už od počátku člověka se snažíme porovnávat a měřit vzdálenosti různých předmětů. V dnešní době se stala nedílnou součástí každodenního života. Měření vzdálenosti do všech technických odvětví jako je průmysl, stavebnictví, tvorba map, GPS lokace. Pro měření vzdáleností slouží senzory polohy, které měří velmi malá posunutí, řádově milimetry, až po zařízení schopna měřit v řádech kilometrů. Rozlišují se podle principu měření vzdálenosti, přesnosti měření a schopností odolávat různým druhům prostředí např. vlhkost, různé plyny, v nebezpečných prostředích např. radiace.

V mé práci se zabývám malými posunutími do délek centimetrů. Senzory vzdálenosti bych dále rozdělil podle způsobu interakce s okolím.

Dělíme je na:

- kontaktní
- bezkontaktní

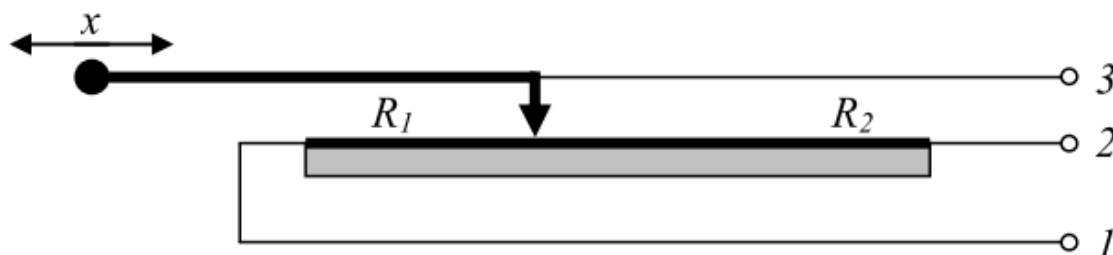
1.1. Kontaktní měření

Tyto senzory se využívají v nepřístupných místech zakouřeného a členitého prostředí. Tento způsob také říká to, že senzor je součástí stroje přesněji nějaké jeho pohyblivé části například výsuvného ramena. Senzor má tedy dvě části pevnou a pohyblivou. Pevná část je upevněna na stroji a pohyblivá je přidělena k pohybující se konstrukci. Z toho plyne, že při pohybu pohyblivé části dochází ke změně většinou elektrické fyzikální veličině. Bývají to většinou elektrický odpor, amplituda sinusových či jiných průběhů, nebo jejich fázový rozdíl mezi dvěma signály. Podle způsobu převedení signálu mají senzory jinou přesnost od jednotek procent až po setiny procenta z jejich možné měřené délky. Dělíme je tedy podle toho, jakým způsobem převádí mechanický pohyb na elektrický signál:

- odporové:
 - lineární posuvné
 - rotační lankové
- magnetostrikční
- transformátorové
 - indukční (LVDT)
 - indukčnostní

1.1.1. Odporové senzory vzdálenosti

Jedná se o jeden z nejjednodušších principů snímání polohy. Základem je proměnný rezistor, buď lineární posuvný, nebo otočný, k jehož jezdcí je připevněn předmět, jehož polohu je třeba měřit (viz Obrázek 1).



Obrázek 1: Uspořádání lineárního odporového senzoru polohy

Jedná se tedy o potenciometr, který bývá vytvořen nanesením odporové vrstvy na podložku či keramický váleček. Do odporové vrstvy se vybrousí drážka, čímž se určuje velikost elektrického odporu a také citlivost změny elektrického odporu na posunutí jezdce. Odporové senzory vzdálenosti mohou být také vyrobeny navinutím odporového drátu na vhodnou kostru. Hodnota elektrického odporu je dána materiálem, tvarem i teplotou vodiče. Velikost odporu závisí přímo úměrně na délce vodiče l , nepřímo úměrně na obsahu průřezu vodiče S a na materiálové konstantě, která charakterizuje elektrickou vodivost látky (měrný elektrický odpor ρ).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1)$$

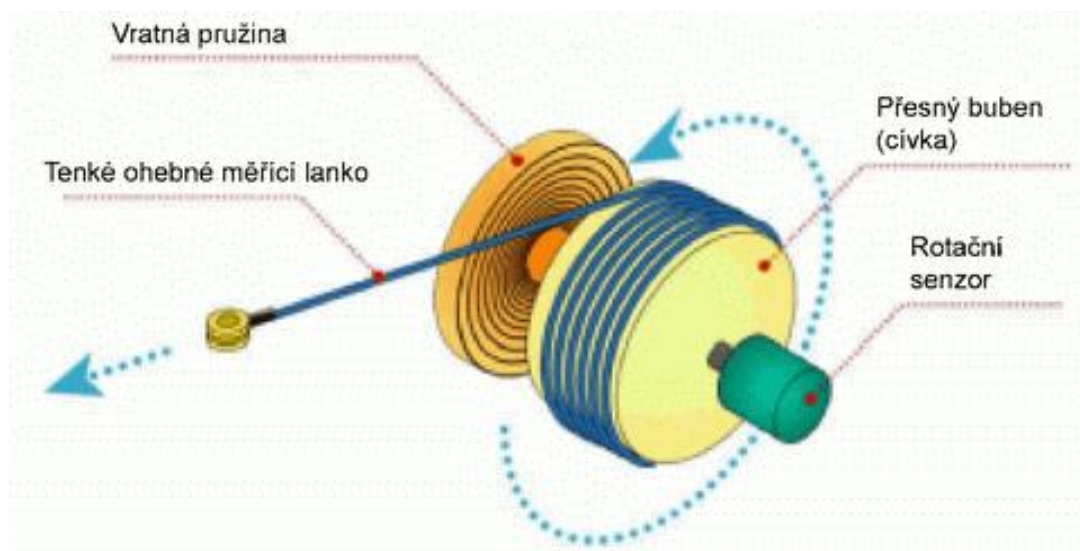
Elektrický odpor je také závislý na teplotě a lze tuto závislost vyjádřit vztahem:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \Delta t) \quad (2)$$

Kde R_0 je odpor vodiče při teplotě t_0 , $\Delta t = T - T_0$ je teplotní rozdíl a α je teplotní součinitel elektrického odporu charakteristický pro daný materiál.

Odporové senzory se vyznačují velkou linearitou (chyba $< 0,1\%$ a lepší). V praktických aplikacích se však nepoužívá jednoduché vyrobení měření odporu mezi jezdce a jedním z konců odporové dráhy, ale používá se potenciometrické zapojení, které eliminuje změny elektrického odporu odporové dráhy způsobené např. teplotou. Pro eliminaci tepelných vlivů můžeme také zapojit odporovou dráhu zapojit do můstku, kde pak sledujeme odchylku můstku, která je úměrná poměru odporů.

Rotační lankový odporový senzor vzdálenosti je v principu buben s navinutým ohebným lankem. Buben je připevněn na vysokootáčkový potenciometr. Odvíjením lanka se otáčí i potenciometr a tím se mění elektrický odpor, který je úměrný odvinutému lanku. (Obrázek 2). Problém je se vzdáleností lanka, protože jim musí odpovídat příslušné otáčky potenciometru. Otáčky odvinutého bubnu se přenáší přes převody na osu potenciometru. Délka lanka se pohybuje podle měřené vzdálenosti a ta je od 5 centimetrů do 60 metru.



Obrázek 2: Základní struktura skrývající se pod krytem typického lankového snímače[4]



a)



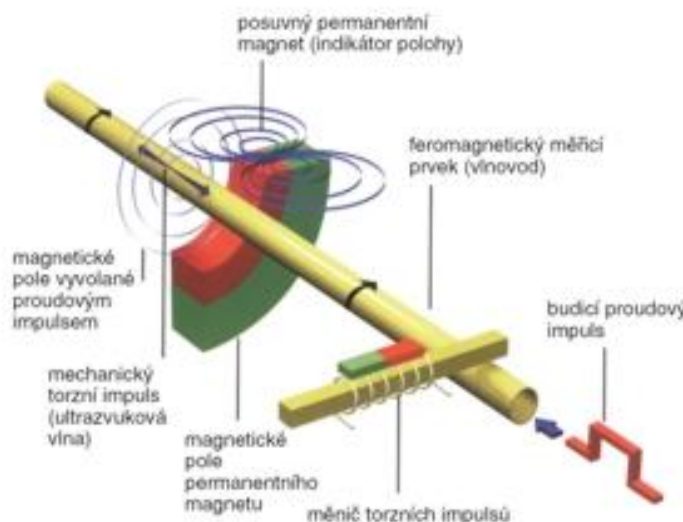
b)

Obrázek 3: a) lineární odporový senzor b) rotační lankový senzor [4]

1.1.2. Magnetostrikční senzory vzdálenosti

Zde jak už z názvu vyznívá „magnet“, souvisí s magnetickými účinky. Magnetostrikční senzory využívají k určení polohy kombinaci magnetomechanických jevů ve feromagnetickém materiálu, kde samotné měření souvisí s přesným měřením doby šíření mechanického torzního impulsu (ultrazvukové vlny). Jde tedy o bezkontaktní měření vzdálenosti, které je vyvoláno po přiložení magnetu na senzor případně měření vzdálenosti při pohybu magnetu po senzoru.

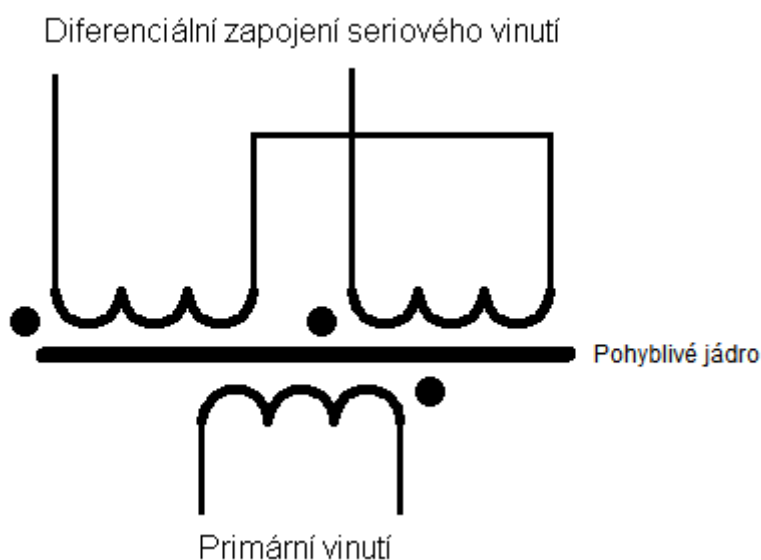
Základními částmi magnetostrikčního senzoru vzdálenosti jsou feromagnetický měřicí prvek tvaru tyče označovaný jako vlnovod a posuvný permanentní magnet spjatý se sledovaným objektem, který vytváří ve vlnovodu podélné magnetické pole (Obrázek 4).



Obrázek 4: Princip magnetostrikčního měření vzdálenosti[5]

Mezi posuvným permanentním magnetem (pracovní magnet ve funkci indikátoru polohy sledovaného objektu) a měřicím prvkem (vlnovodem) přitom neexistuje žádné přímé mechanické spojení. Při měření vysílá elektronika senzoru do vlnovodu krátké proudové impulsy, které vytvářejí proměnné magnetické pole radiálně působící okolo vlnovodu a šířící se podél vlnovodu rychlostí světla. V místě, kde se radiální magnetické pole setká s podélným magnetickým polem pracovního magnetu, dojde k mechanické torzní deformaci feromagnetického vlnovodu. Tím vznikne mechanický torzní impuls, který se šíří jako ultrazvuková vlna vlnovodem od místa vzniku k oběma jeho koncům. Na volném konci vlnovodu je pohlcen tlumicím obvodem, čímž se vyloučí případné rušivé vlivy na snímání signálu. Na druhém konci vlnovodu je magnet s cívkou, na kterou se naindukuje napětí. Měříme jen zpoždění od signálu vyslaného do vlnovodu do hodnoty, kdy se naindukuje ve vyhodnocovací cívce. Na druhém konci vlnovodu (v hlavici snímače) zjišťuje příchod torzní vlny speciální měnič torzních impulsů, který se skládá z magnetostrikčního kovového pásku spojeného s vlnovodem, z indukční snímací cívkou a z pevného permanentního magnetu. Torzní vlna způsobí změnu permeability kovového pásku. Ta se projeví časovou změnou magnetického pole pevného magnetu, která ve snímací cívce indukuje elektrický impuls. Protože se torzní vlna šíří vlnovodem konstantní ultrazvukovou rychlostí, lze vzdálenost mezi snímací cívkou a polohou pracovního magnetu snímače určit z doby, která uplyne mezi vysláním budicího proudového impulsu a vznikem elektrického impulsu ve snímací cívce měniče torzních impulsů. Jedná se o princip měření doby průletu, měření doby mezi přijímaným a vysílaným signálem. Zjištěný časový rozdíl je možné přeměnit známými metodami na analogový nebo digitální výstupní signál ze snímače úměrný okamžité

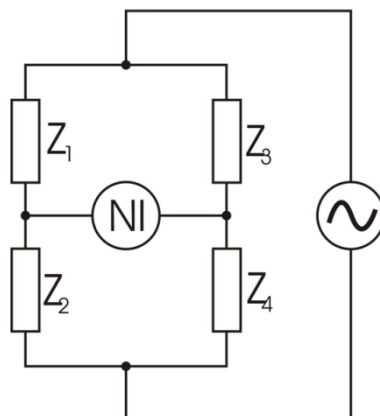
velmi odolné magnetické snímače pro kontaktní snímání přiblížení v řád



jako na primárním vinutí, jehož amplituda odpovídá rozdílu napětí jednoho sekundárního napětí od druhého. Díky tomu je možné zaznamenat nejen pohyb tyčky a tedy blízkost předmětu, ale díky vzájemnému fázovému posuvu dílčích signálů o 180° od sebe elektricky odlišit i obě vinutí a tím identifikovat směr pohybu, tedy zda se předmět přibližuje nebo oddaluje.

1.1.4. Indukční senzory vzdálenosti

Indukční senzory jsou podobné senzorům indukčním. Jsou tvořeny ze dvou částí. První část je tvořena dutým válcem, ve kterém jsou jen dvě cívky zapojené do série. Cívky mají vyvedeny konce do svorkovnice. Druhou částí je feromagnetické jádro, které svým pohybem vyvolá změnu magnetického toku v obou cívkách. Abychom mohli měřit rozdíl napětí mezi cívkami, musíme je zapojit do tak zvaného „můstku“ s obecnými impedancemi Z_1 - Z_4 . Polovina můstku je tvořena indukčním senzorem a druhá polovina je tvořena impedancemi. Můstek je pak napájen střídavým napětím o frekvenci potřebné pro senzor. Na napěťovém indikátoru měříme rozdílné napětí mezi vyvedeným středem senzoru a středem impedancí. Senzor je tvořen impedancemi Z_1 a Z_2 ,nebo impedancemi Z_3 a Z_4 . (viz. Obrázek 6)



Obrázek 6: Obecný můstek

1.2. Bezkontaktní měření vzdálenosti

Tento způsob využívá pro všechny druhy bezkontaktního měření stejný postup. Liší se jen, jak převedou elektrickou energii na jinou energii, kterou budu zpětně zachytávat a vyhodnocovat. Jak jsem už naznačil, postup vychází z jednoduché logiky. Jelikož je to bezkontaktní měření musíme mít dvojici senzorů, vysílač a přijímač. Vysílač vysílá signál a na přijímači očekáváme příchod signálu. Vyslaný signál se může ihned přijmout, tedy máme rozdělen přijímač a vysílač na dvě části, nebo přijímač a vysílač je v jednom kompaktním celku a měřený signál, je signál, který se odráží od měřeného objektu. Čili měříme dvojnásobnou vzdálenost. Princip měření vzdálenosti vychází z měření doby průběhu šíření

signálu. Tato doba se dále vyhodnocuje, zpracuje a pošle se jako data do počítače nebo do zobrazovacího bloku. Dělíme je na:

- laserové (infračervené)
- ultrazvukové

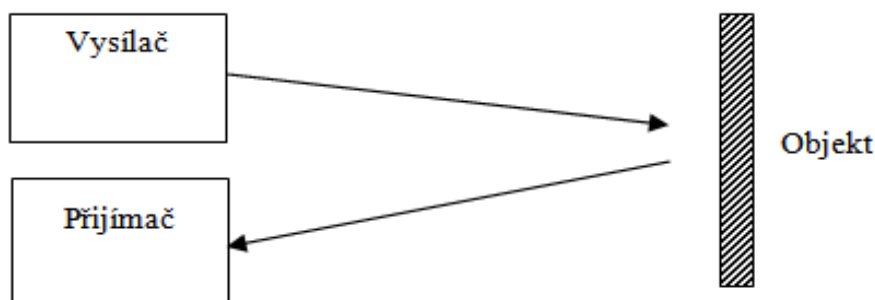
1.2.1. Laserové, infračervené měření vzdálenosti

Jde vlastně o optické měření vzdálenosti, kde svítím nějakým laserem nebo jen obyčejnou přímo vyzařující diodou na povrch daného tělesa. Tento způsob měření je velmi vhodný pro mnoho aplikací nejen pro měření vzdálenosti ale i pro počítání kde vycházíme z logiky jedniček a nul. Nebo poslední příklad jako optické brány, které slouží k ochraně zaměstnanců v průmyslu. Zde všude se projevuje určitá zpoždění a ovlivnění, či jeho útlumu signálu způsobený procházejícím prostředím a odrazem od objektu, který je nějak prostorově vázán, tedy neodráží všechnu vyslanou energii zpět. Na obrázku ve spod je využití k měření vzdálenosti. Toto měření se dá aplikovat do velkých vzdáleností v řádech kilometrů, kde potřebujeme velmi přesné vysílače a přijímače. Prakticky bývá přijímač i vysílač v jednom pouzdře.

Měření vzdálenosti vychází z principu měření průběhové doby světla. Je vyslán světelný paprsek, který se odrazí od objektu. Je měřena délka doby světelného paprsku, která uplyne od okamžiku jeho vyslání k jeho návratu po odrazu od objektu. Protože rychlost světla je konstantní, je možno z průběhové doby světla vypočítat vzdálenost.

$$s = \frac{v \cdot t_{prubehova}}{2} \quad (3)$$

Ze spodního obrázku 7 je očividné, že vyslaný signál urazí vzdálenost k přijímači dvakrát delší. Nejdříve vzdálenost k objektu a poté vzdálenost zpět k senzoru. Celkovou naměřenou vzdálenost musíme dělit dvěma.



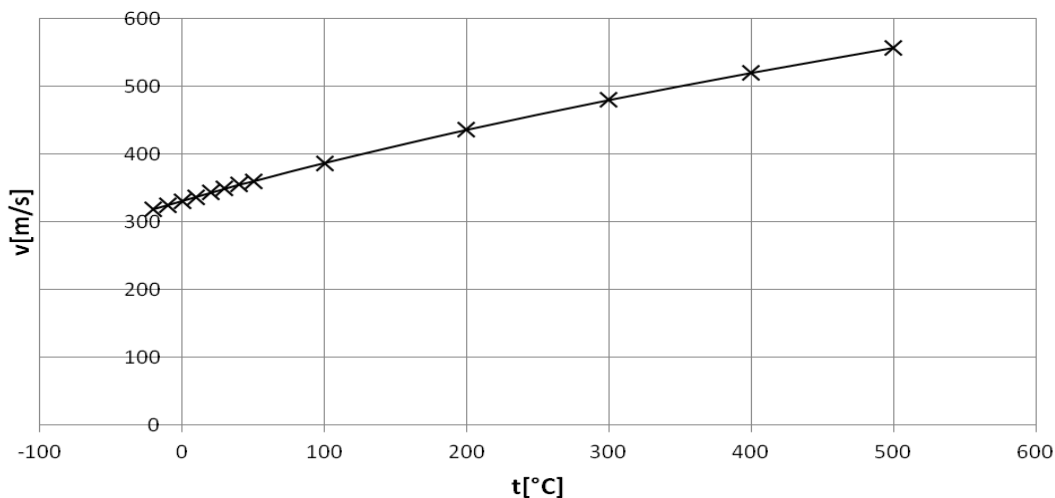
Obrázek 7: Princip bezkontaktního měření vzdálenosti

1.2.2. Ultrazvukové měření vzdálenosti

Tento způsob se od laserového tolik neliší, jen ke své činnosti nevyužívá svazek fotonů, ale ultrazvukovou vlnu a od toho se odvíjí jeho vlastnosti. Princip měření je stejný, jako v metodě laserového měření. Platí Obrázek nahoře. Tedy pro ultrazvuk platí stejné fyzikální zákony jako pro zvukové vlny slyšitelného pásma. Zvuk vzniká chvěním hmoty, která toto chvění zachytává a předává jej hmotným částicím prostředí, například vzduchu. Oproti elektromagnetickým vlnám se mohou zvukové vlny šířit jen hmotou. Vzduchoprázdňem se nešíří. Ve vzduchu nastane zhušťování a zředňování částic. Místa zhuštění a zředňování postupují vzduchem určitou rychlostí nazývanou rychlost šíření zvuku c . Částice se při tom nepřemísťují, pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Předpokladem pro šíření zvuku hmotou je její elasticita. Dvě sousední místa maximálně nebo minimálně zhuštěných částic tvoří zvukovou vlnu. Počet těchto zhuštění a zředňování za jednu sekundu se nazývá kmitočet f . Rychlost šíření zvuku závisí na prostředí, v němž se zvuk šíří. Při daném prostředí závisí ještě na jeho fyzikálním stavu: tlaku, teplotě a u vzduchu (plyny) na vlhkosti. (viz Tabulka 1, Obrázek 8)

Tabulka 1 Závislost teploty a změny šíření ultrazvuku

$t[^\circ\text{C}]$	-20	-10	0	10	20	30	40	50	100	200	300	400	500
$v[\text{m/s}]$	319	325	331	337	343	349	355	360	387	436	480	520	557

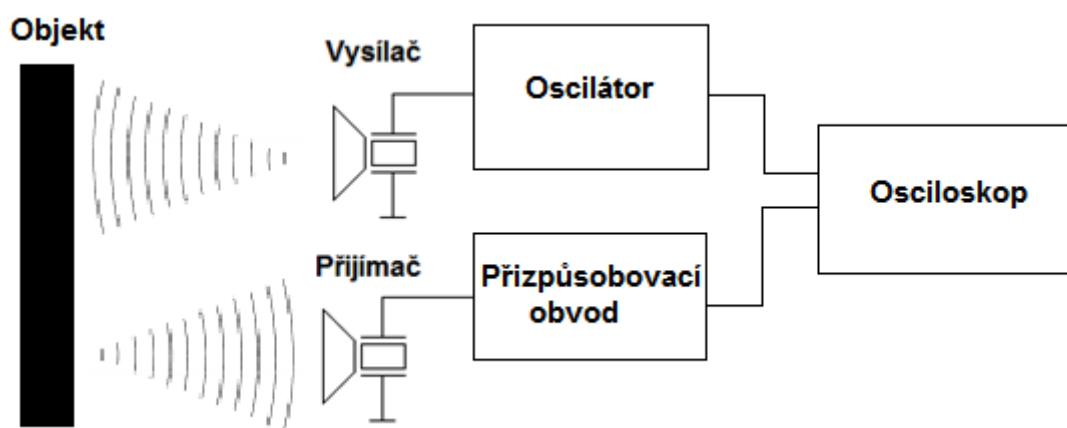


Obrázek 8: Závislost ultrazvuku na změně teploty okolí

2. Návrh a realizace vlastního ultrazvukového senzoru vzdálenosti

2.1. Základní model senzoru

V metodě měření vzdálenosti pomocí ultrazvuku se využívá metody měření, jak bylo již znázorněno v předešlé kapitole. Musíme mít dva senzory, které slouží jak vyslání tak přijetí ultrazvukové vlny. Vysílač musíme budit střídavým signálem z oscilátoru, který je ovládán z vnějšího prostředí, vysíláme tak zvané echo. Na druhé straně přijímač přijme informaci z prostředí. Potřebuji ji zpracovat a nějakým způsobem předložit pro měření. Měření provádíme osciloskopem, kde zachytáváme spouštěcí signál na oscilátoru a konec měření je ukončen přijetím vyslaného signálu (echa). Při vyslání echa započneme měření, příjmem echa měření končí. Změřený čas odpovídá změřené vzdálenosti. Celkový model je naznačen na Obrázku 9 ve spod.

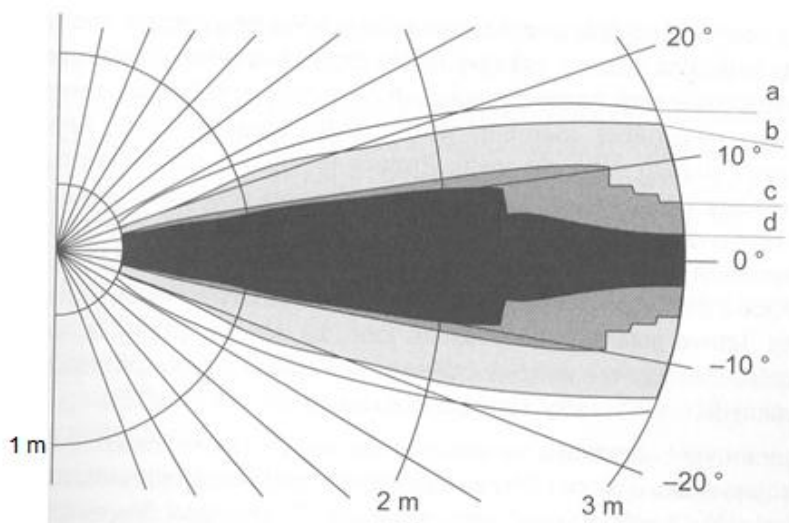


Obrázek 9: Základní model senzoru

2.2. Ultrazvukové senzory přiblížení

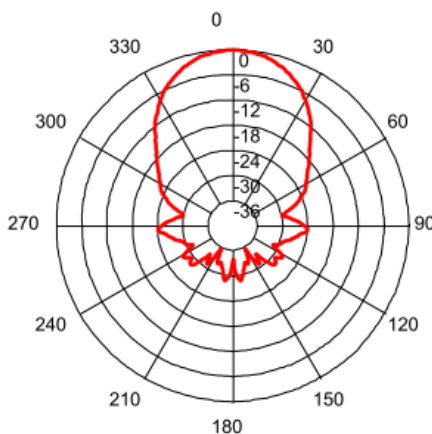
Hlavní součástí ultrazvukového senzoru je měnič zvuku. Jako měniče zvuku se běžně používají piezokeramické měniče. Základním materiálem takového měniče jsou piezoelektrické krystaly, které však kvůli vysoké ceně nahradila piezokeramika. Ta má tu vlastnost, že při přiložení napětí změní své geometrické rozměry, tedy mění elektrickou energii na mechanickou. V provedení měničů jde o keramický kotouček slepený se stejně velkým kovovým kotoučkem. Přiložením napětí změní piezoelektrický kotouček svůj průměr, vzniknou příčné síly a dojde k prohnutí celého systému s velkou amplitudou. K buzení měniče v senzorech se pak využívá krátkodobě spínaný oscilátor naladěný na rezonanční frekvenci měniče. Tím vznikají mechanické vibrace. Pro snazší prostup mechanických kmitů měniče do prostoru je na měniči ještě propojovací vrstva s prostředím, která sladuje akustické impedance piezokeramického materiálu a vzduchu. Akustická impedance

propojovací vrstvy musí odpovídat $Z_A = \sqrt{Z_K \cdot Z_L}$. (kde Z_K je akustická impedance piezokeramiky, Z_L je akustická impedance vzduchu, $Z = \rho \cdot c_m$ kde ρ je hustota média, c_m je rychlost zvuku média). Bez těchto hodnot bude do vzduchu uvolněno nebo přijato pouze malý zlomek akustické energie, což by značně snížilo detekční dosah. Detekční či vysílací dosah měničů je udán prostorovými charakteristikami. Jsou to směrové vyzařovací charakteristiky. Směrová vyzařovací charakteristika je graf, vyjadřující závislost vyzařování na směru, udává závislost hladiny akustického tlaku na úhlu natočení měřicího mikrofonu od osy senzoru při konstantní vzdálenosti. Většinou se vyjadřuje pomocí polárních souřadnic. Nulový úhel je v akustické ose senzoru.



Obrázek 10: Směrová přijímací charakteristika přijímače

Na obrázku je vidět, že přijímací úhel je velmi malý, přibližně 20° , to mi během nastavování senzoru, pro nejlepší příjem, komplikovalo situaci, protože jak je vidět na porovnání obrázku 10 a obrázku 11 musel jsem senzory nastavit, tak aby akustické osy byli zároveň a aby úhel mezi nimi byl co nejmenší.



Obrázek 11: Směrová vyzařovací charakteristika vysílače

2.3. Oscilátor - vysílací část ultrazvukového senzoru

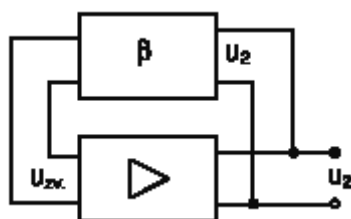
2.3.1. Oscilátory

Oscilátor je elektrické zařízení schopné kmitavého pohybu. Nezpracovávají žádný signál, ale jsou sami zdrojem střídavých signálů. Ze stejnosměrného napájecího napětí vytvářejí napětí střídavá. Druhů oscilátorů je mnoho.

Podle principu činnosti se rozdělují:

- na oscilátory zpětnovazební – základem je zesilovač s vhodně zavedenou kladnou zpětnou vazbou
- na oscilátory s prvkem se záporným diferenciálním odporem – použití součástky se záporným diferenciálním odporem př. tunelová dioda, která svým diferenciálním odporem v rezonančním obvodu hradí ztráty.

Vysílací část je tvořena zpětnovazebním oscilátorem sinusového průběhu napětí. Základem takového oscilátoru je zesilovač s kladnou zpětnou vazbou. Aby se ze zesilovače stal oscilátor, musí být splněno několik podmínek pro vznik oscilací. První podmínka je fázová podmínka $\sum \varphi = 0^\circ$. Ta říká, že součet fázových posunutí v uzavřené smyčce, tvořené zesilovačem a zpětnou vazbou, musí být roven 0° , nebo násobkům 360° . Druhou podmínkou pro vznik oscilací je amplitudová podmínka $\beta \cdot A > 1$, která říká, že součin činitele zpětné vazby β a velikost výkonového zesílení zesilovače A musí být větší jak 1. Při větších hodnotách tohoto součinu je vyráběný sinusový průběh napětí zkreslený vyššími harmonickými, což je nežádoucí. Pokud tuto podmínku upravíme na $\beta \cdot A = 1$, které se říká rovnovážný stav, způsobí, že se amplituda sinusových kmitů přestane zvedat do nekonečna, ale bude mít konstantní amplitudu. Obecný zpětnovazební oscilátor je na obrázku 12.

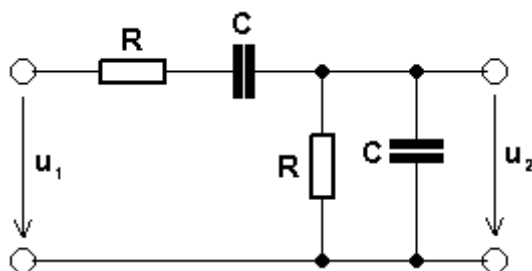


Obrázek 12: Obecný zpětnovazební oscilátor

Oscilátory se vyrábějí z pasivních součástek, rezistorů, kondenzátorů a cívek. Cívky se příliš často nepoužívají, protože způsobují rušení a nelze je vyrobit v integrované podobě. Nelze vytvořit nízké frekvence. Hlavním důvodem je neschopnost přenastavování frekvence, kterou je s cívkami velmi složité přenastavit, abychom dodrželi amplitudovou a fázovou podmínku a tím vytvořili stabilní oscilace. Proto se používají RC oscilátory. RC oscilátory se nastavují vhodným zapojením RC členů do zpětné vazby zesilovače. Kmitočet oscilátoru má lineární funkci časové konstanty $\tau = R \cdot C$. Tím se RC oscilátory dají snadno přeladit. Vhodnými kombinacemi rezistorů a kondenzátorů mohou vytvořit integrační a derivační článek, jejímž zapojením do zpětné vazby získám oscilátor. Nahradím-li rezistory potenciometry, mohu si

libovolně nastavovat frekvenci vzniklých kmitů za předpokladu, že dodržím předešlé podmínky.

V mé práci jsem se zabýval oscilátorem s Wienovým článkem. Tento RC oscilátor patří mezi můstkové oscilátory. Wienův článek je vytvořen kombinací RC členů, které jsou zavedeny mezi výstup a vstup operačního zesilovače. Oscilační kmitočet je určen zpětnou vazbou RC článků, které má na jednom kmitočtu nulový fázový posuv a jeho přenos je na tomto kmitočtu maximální.

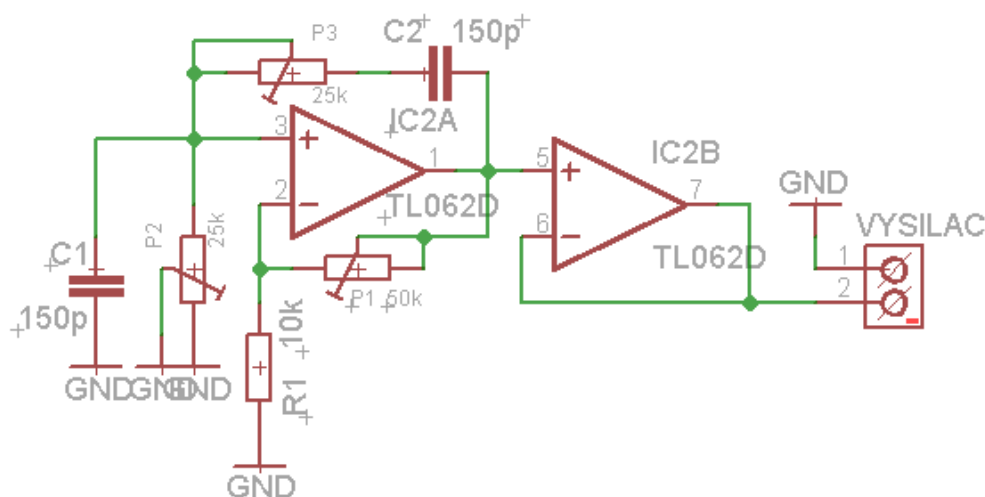


Obrázek 13: Wienův článek

Wienův článek je vytvořen sérioparalelní kombinací dvou stejných rezistorů a kondenzátorů zapojených dle obrázku 13. Toto zapojení má na kmitočtu:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (4)$$

největší přenos rovné jedné třetině a na tom to kmitočtu neposouvá fázi výstupního napětí. Zapojuje se do kladné zpětné vazby. Tím je splněna fázová podmínka pro vznik oscilací. Amplitudová podmínka tedy $\beta \cdot A = 1$ se splní nastavením vhodné zpětné vazby operačního zesilovače. Stabilizaci amplitudy a nastavení zesílení zesilovače, které je rovno 3, provádíme zavedením záporné zpětné vazby.



Obrázek 14:Wienův oscilátor s napěťovým slepovačem

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 150 \cdot 10^{-12}} = 26,576 \cdot 10^3 \Omega \quad (5)$$

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 150 \cdot 10^{-12}} = 26,576 \cdot 10^3 \Omega \quad (5)$$

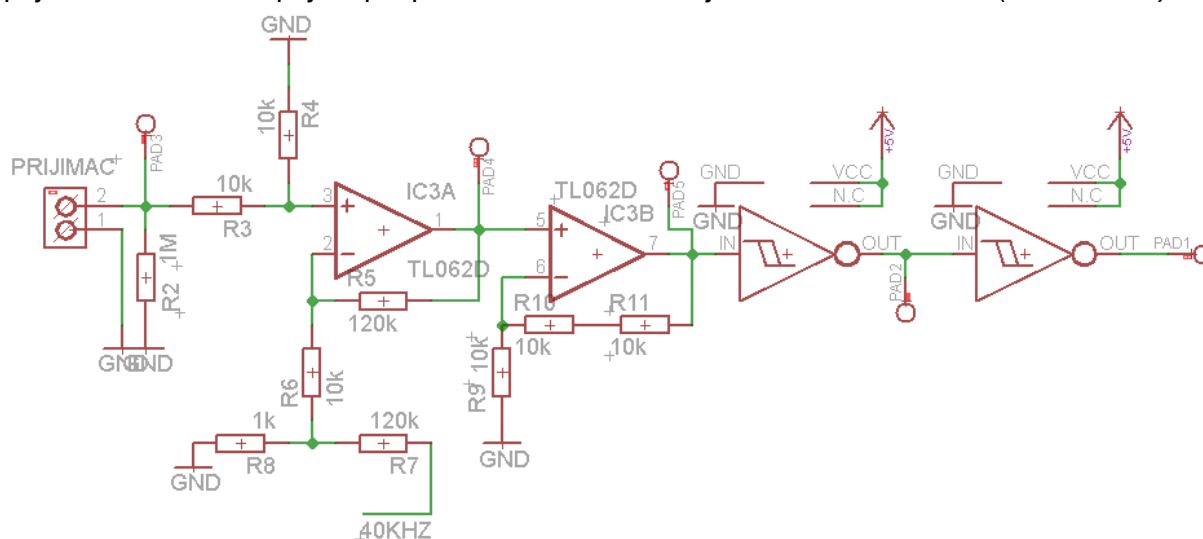
Hodnota potenciometru je rovna $P = 50 \cdot 10^3$. Tyto hodnoty součástek odpovídají hodnotám ve skutečném obvodu. Záporná zpětná vazba musí mít zesílení 3. Kde hodnota rezistoru R1 pro doregulování je rovna 10 K Ω . Vysílací část je ovládána tlačítkem, které spíná a rozpíná napájení u operačních zesilovačů a tím zapíná a vypíná oscilátor.

2.3.2. Přijímací část ultrazvukového senzoru

Ze senzoru jde signál velmi slabý a zarušený, který je závislý na měřené vzdálenosti. Proto použiji pro zesílení signálu operačního zesilovače, který je zapojen jako neinvertující

zesilovač se zesílením $A_u = 1 + \frac{R_5}{R_6} = 1 + \frac{120 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 13$. V záporné zpětné vazbě se

vyskytuje dělič, který je napájen střídavým napětím 40KHz. Výstup tohoto děliče poskytuje frekvenci 40KHz s amplitudou 120krát menší. Výstup děliče tvoří referenční napětí, které se od přijatého signálu odečítá. Odečítá se kvůli šumu, který vzniká na piezoelektrickém měniči. Jelikož vysíláme signál o frekvenci 40kHz, pak tedy musíme tuto frekvenci očekávat také na přijímači. Schéma zapojení přizpůsobovacího obvodu je na obrázku 15 dole (Obrázek 15).



Obrázek 15: Přizpůsobovací obvod ultrazvukového senzoru

Měřené napětí je tedy zesíleno 13krát a poté ještě 3krát. Zesílení 3krát odpovídá druhému

zesilovači, jehož zesílení je rovno $A_u = 1 + \frac{R_{10} + R_{11}}{R_9} = 1 + \frac{10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 3$. Celkový

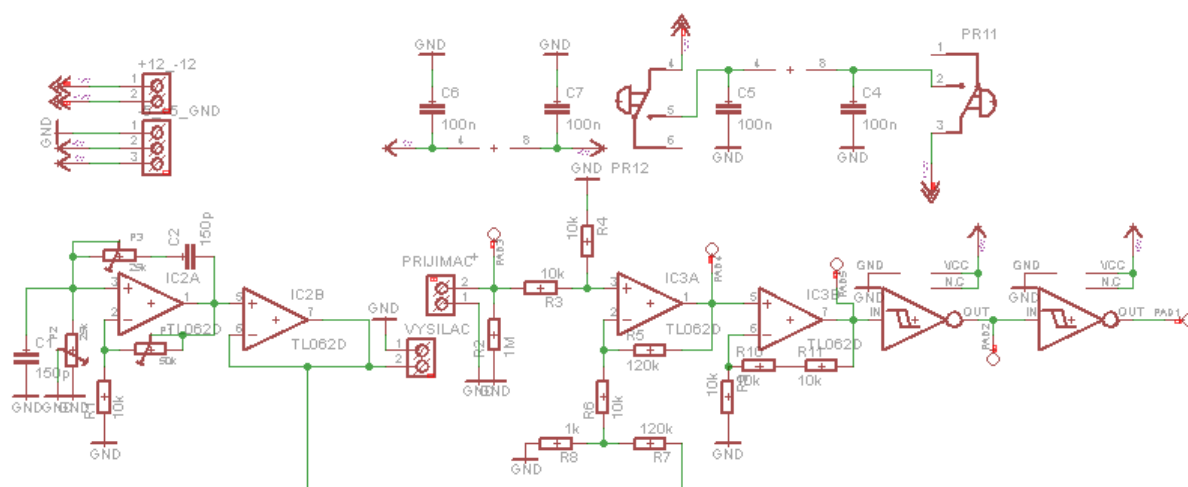
signál je zesílen přibližně 40krát. Toto napětí porovnáme ve schmittově klopném obvodu dvakrát, protože výstup tohoto obvodu je nenegován. Druhý schmittův klopný obvod slouží jen jako negace signálu. Schmittův klopný obvod je odvod, který se překlápí podle velikosti

vstupního napětí. Zapne se při určité velikosti napětí signálu a vypne se při jiné velikosti signálu. Je to obvod, který má hysterezi. Přepnutí hodnoty na úroveň 1 je při napětí $U = 2,3V$ a přepnutí do úrovně 0, musí překonat napětí $U = 1,3V$. Příjem signálu na přijímači se projeví na výstupu přizpůsobovacích obvodů jako obdélníkový signál s proměnnou šířkou. Šířka je závislá na velikosti přijímaného signálu.

2.3.3. Shrnutí vlastností navrženého ultrazvukového senzoru

Celý obvod ultrazvukového senzoru je složen ze dvou částí, generátoru a přizpůsobovacího obvodu. Celý obvod je navržen na jedné desce plošných spojů, která má vyvedeny signály pro měření časově zpožděných impulsu. Obsahuje svorkovnice pomocí, kterých připojují senzory přiblížení a svorkovnice pro napájení celého obvodu. Velikost odběru proudu celého zařízení je malý řádově desítky mA. Spotřeba je malá, protože v zapojení používám hlavně operační zesilovače. Výstupy operačních zesilovačů jsou napěťové. Rozsah měření je odzkoušen na vzdálenost 0 až 30 cm. V tom rozsahu je prováděno měření na přípravku. Rozsah měření se může zvětšit, ale pro zvětšení je nutná manipulace se senzory, které se provede jemným ohýbáním senzorů. Závisí také na velikosti energie, kterou vysíláme do prostředí prostřednictvím ultrazvukové vlny. Tato vlna postupným předáváním energie zhušťuje a zředňuje prostředí v dané frekvenci. Toto předávání způsobuje ztrátu energie. Největší ztráty nastávají při odrazu signálu od měřeného objektu, kde dojde k odrazu a pohlcení. Pro mé účely jsem celý obvod napájel symetrickým napětím $\pm 12V$ a symetrickým napětím $\pm 5V$. Vysílací část je napájena symetrickým napětím $\pm 12V$. Příjemací část je napájena $\pm 5V$.

Vysílací část obvodu byla původně vytvořena pomocí obvodu 555. Pomocí obvodu 555 jsem vytvářel obdélníkový signál pro vysílač. Zde nastal problém, protože při změně signálu z jedné saturace do druhé docházelo k zatížení zdroje. Zdroj není tak tvrdý a došlo k poklesu napětí, čímž jsem vytvářel rušení na napájecím napětí, které jsem měl připojen ještě jednu měřicí úlohu pro měření vzdálenosti indukčnostního senzoru posunutí. Tento problém jsem vyřešil náhradou obvodu 555 za oscilátor, který vytváří harmonický sinusový průběh. Celkový navržený obvod je vyobrazen na obrázku 16.

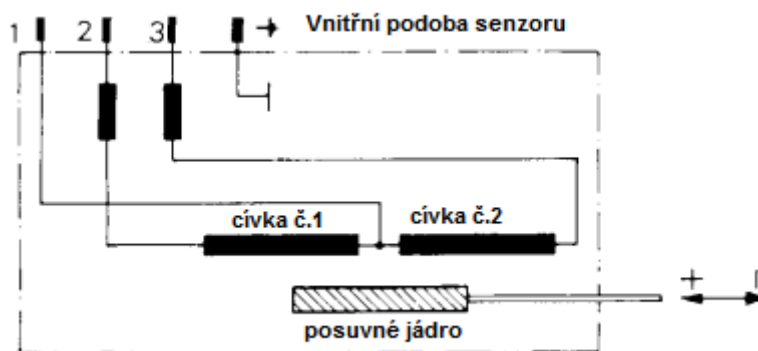


Obrázek 16: Kompletní navržený obvod

3. Návrh a realizace obvodů pro indukčnostní senzor vzdálenosti

3.1. Vlastnosti indukčnostního senzoru vzdálenosti a jeho fyzikální podstata

Jedná se o lineární snímač s velkou rozlišovací schopností. Jeho přesnost a spolehlivost závisí na jeho konstrukci, která připomíná válec s dutinou. V této dutině jsou uloženy dvě cívky v sérii, jejichž vývody jsou vyvedeny na panel senzoru, který je součástí senzoru. Panel senzoru má vyvedeny 4 vodiče. Dutinou senzoru prochází jádro, které je vytvořeno z feromagnetického materiálu, jehož zasunutím do válce ovlivňuje magnetické pole cívek. Z toho plyne, že cívky nemusejí být vystaveny okolním vlivům a mohou být úplně izolovány od okolního prostředí. Tvoří tedy uzavřený válec. Vnitřní schéma senzoru je na obrázku 17.



Obrázek 17: Vnitřní schéma indukčnostního senzoru

Na cívky připojíme napětí, které průchodem proudu cívkou vytvoří magnetické pole. Vznikne také magnetický tok, který je přímo úměrně závislý na indukčnosti cívky a na velikosti procházejícího proudu. Podstata měření vychází tedy ze zvětšování či snižování magnetického pole cívek, které se dá ovlivnit vložením magnetického jádra. Magnetické pole jádra se tedy přičte k vytvořenému magnetickému poli cívky, což zvýší jeho magnetický tok. Hodnota naindukovaného napětí na cívce se dá vypočítat ze spodní rovnice (6).

$$U = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di_L}{dt} \quad (6)$$

Kde N je počet závitů cívky, Φ je magnetický indukční tok, L indukčnost cívky a i_L je proud procházející cívkou. Ze vzorce je vidět časová závislost.

V následující tabulce jsou vypsány důležité vlastnosti indukčního senzoru, které jsou nutné pro zakomponování senzoru na klidné nebo pohyblivé objekty.

Tabulka 2: Vlastnosti použitého senzoru

vlastnost		velikost	
nominální vzdálenosti		±50	mm
nominální rozsah		100	mm
Pracovní rozsah		105	mm
výchylka výstupního signálu		80	mV/V
Budící frekvence		5	KHz
sled fází		4	°
Doporučené budící napětí		2.5	V
indukčnost		10	mH
ohmický odpor mezi svorkou 2 a 3		56	Ω
přípustné zrychlení:	snímače	100	m/s ²
	pístu	200	m/s ²
chyba linearity		<±0,5	%

3.2. Model indukčního senzoru

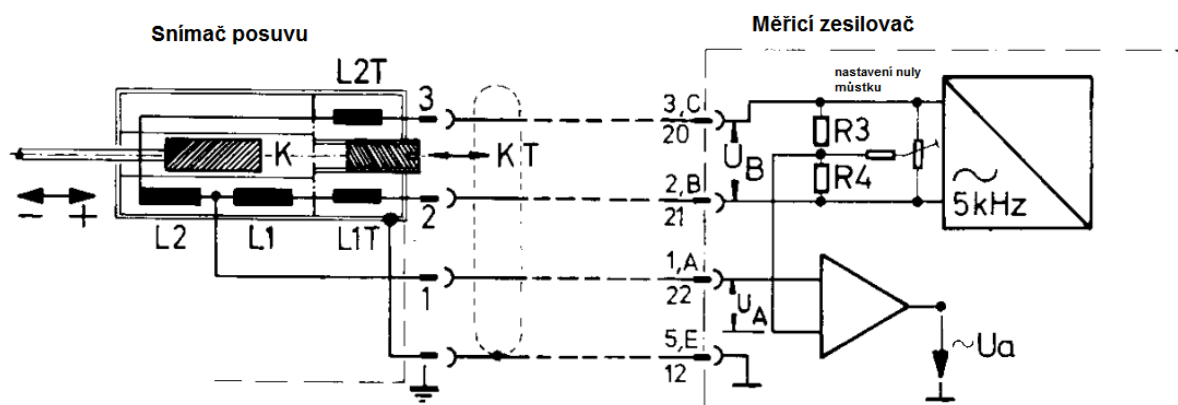
Senzor má vyvedeny 4 vodiče. Tři vodiče jsou propojeny s jednotlivými cívkami, které jsou v sérii. A poslední vodič je vodič propojený s kovovým obalem senzoru, který pro potlačení rušení propojujeme se zemním signálem. Dále je složen z měřicího zesilovače. Ten se dá rozdělit na přijímací a vysílací část.

Vysílací část je generátor střídavého napětí o frekvenci 5KHz. A ten je napojen na Wheatstoneův můstek. Snímač posuvu je vlastně diferenční induktor, který je tvořen dvěma identickými cívkami L1 a L2 na stejné ose. Ty jsou známy jako Wheatstoneův polo-most, který je připojen k nosné frekvenci generátoru. Přidám-li k Wheatstoneově polo-mostu rezistory R3 a R4, změním zapojení na plný můstek. Diferenční zapojení se z můstku stává jen tehdy, je-li píst s feromagnetickým jádrem přemístěn do dutého válce s cívkami. Kde jeho poloha násobí magnetické pole cívky, které je dané vzdáleností zasunutí pístu do snímače posuvu. Dojde ke zvýšení indukčnosti jedné a ke snížení druhé cívky, což způsobí rozvážení můstku.

Generátor střídavého napětí napájí můstek s nosnou frekvencí 5 KHz s amplitudou $U_{ss} = 10V$, což odpovídá na obrázku 18 napětí značené jako U_b .

Výstupní napětí měřené mezi cívkami na vývodu senzoru číslo 1 a mezi rezistory R3 a R4 je zde přivedeno do zesilovače. Tato část tvoří přijímač. Zesilovač porovnává napětí mezi

cívkami a mezi rezistory. Výstupní napětí zesilovače má podobu střídavého signálu o amplitudě a fázi závislé na směru posunutí pístu. Můstek může být nulován pomocí trimru, který je připojen paralelně k rezistorům R3 a R4 a jeho proměnný výstup je zapojen v sérii s rezistorem na střed mezi rezistory R3 a R4. Tento trimr zde plní funkci nulovacího, tedy jeho nastavením nulují můstek. Samotné nulování se provádí jen se snímačem posuvu, bez jeho jádra. Jen tehdy je můstek vyrovnaný a mohu jeho nastavováním a vzájemného sledování výchylky na zesilovači, nastavit na nulový signál. Tímto nastavením vytvořím vyvážený můstek, který posuvem pístu rozvážím. Na obrázku 18 vidíte model indukčnostního senzoru. Cívky s názvem L1T a L2T se vyskytují jen u větších snímačů posuvu. Mají vždy stejnou indukčnost. V závislosti na hloubce hlavního čepu KT, snižují napětí na snímacích cívkách, a tím snižují citlivost snímače.



Obrázek 18: Model indukčnostního senzoru

3.3. Návrh měřicího zesilovače

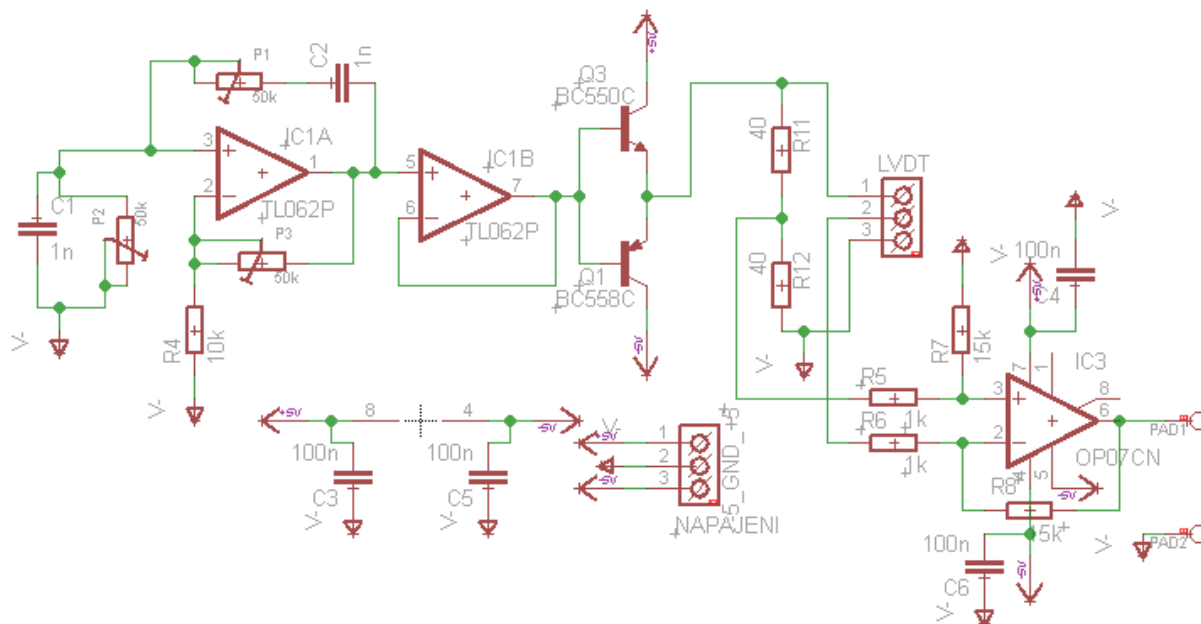
Návrh byl rozdělen na dvě části na část vytvoření generátoru napětí a na část s měřicím zesilovačem tedy výstupní. Pro generování napětí jsem vytvořil oscilátor, který kmitá na frekvenci 5KHz. Tato frekvence je dána snímačem posuvu. Oscilátor jsem použil můstkový s RC kladnou zpětnou vazbou. Hodnotu kapacity kondenzátoru jsem nastavil na 1nF. Odpovídající rezistor se vypočte dosazením do rovnice 1, tedy:

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 31,848 \cdot 10^3 \Omega \quad (7)$$

Hodnota potenciometru je rovna $P = 50 \cdot 10^3$. Tyto hodnoty součástek odpovídají hodnotám ve skutečném obvodu. Záporná zpětná vazba musí mít zesílení 3. Kde hodnota rezistoru R1 pro doregulování je rovna 10 KΩ. Oscilátor se naladí vhodným nastavením trimrů v obvodu. Jelikož na výstup oscilátoru jsem potřeboval připojit Wheatstoneův můstek, kde každá polovina Wheatstoneova můstku byla vlastně kombinací sériově zapojených rezistorů o

hodnotě přibližně 50Ω , čili každá polovina měla přibližně 100Ω . Kde proud touto větví odpovídá $I = \frac{U}{R} = \frac{5}{50 + 50} = 0,05A$. Tento proud odpovídá jedné polovině můstku, po vynásobení 2 dostávám $2 \cdot I = 0,1A$. Jelikož samotný výstup operačního zesilovače nestačí pokrýt takovou proudovou náročnost, musel jsem připojit na výstup oscilátoru výkonový koncový člen tvořený komplementární dvojicí tranzistorů. Výkonový člen pokryl spotřebu můstku.

Výstupní část měřicí odchylky mezi cívkami je vytvořena pomocí rozdílového zesilovače. Samotné naměřené napětí na můstku odpovídalo velmi slabému signálu. Hodnota napětí by měla být dle specifikací snímače posuvu rovna napájecímu napětí krát výchylce výstupního signálu. Napájecí napětí je $5V$ a výchylka výstupního signálu je $80mV/V$. Tedy celkový signál by měl mít velikost napětí $U = 5 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 0,4V$. Toto napětí je teoretické maximální napětí při největšímu rozdílu měřené veličiny na Wheatstoneově můstku. Jedná se i tak o velmi slabý signál. Skutečný naměřený signál odpovídal přibližně hodnotě napětí $U = 0,3V$. Proto jsem toto napětí vynásobil 15. Tedy zesílení rozdílového zesilovače je $A_u = 15$. Celé schéma je na obrázku 19.



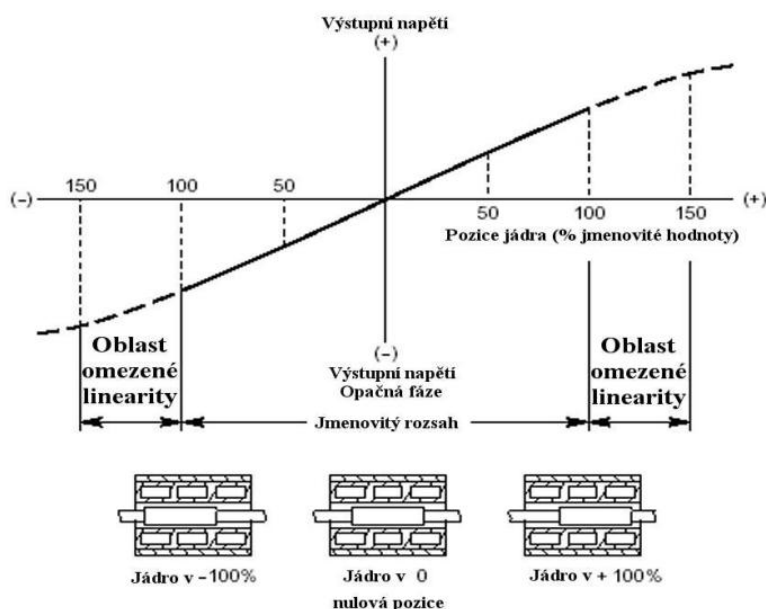
Obrázek 19: Celkové schéma indukčního senzoru

3.4. Shrnutí vlastností navrženého obvodu

Celý obvod je složen ze dvou částí, z částí oscilátoru s koncovým zesilovačem a z měřicího zesilovače, ze kterého odebíráme měřené vzorky. Obvod je vyroben na jedné desce

plošných spojů. Obsahuje svorkovnici pro připojení indukčnostního snímače posuvu a svorkovnici pro připojení napájecího napětí. Celý obvod je napájen symetrickým stejnosměrným napětím o hodnotě $U = 5V$. Spotřeba obvodu je větší kvůli buzení Wheatstoneova můstku. Koncový zesilovač je navržen na zátěž o velikosti 0,5 wattu. Odběr proudu je okolo 100 mA. Měřicí rozsah senzoru posunutí je ± 50 mm od středu lineárního senzoru. Střed posunutí je definován, jako minimální výchylka kde dochází ke změně fáze měřeného signálu. Je tedy definován rozměry snímače posuvu. Přesnost jsem odhadl z provedeného měření na přípravku a z přesnosti referenčního odměřování. Jelikož jsem prováděl měření v domácích podmínkách, zvolil jsem jako referenční odměřování pomocí posuvného měřítka. Přesnost posuvného měřítka je $\pm 0,1$ mm. Nastavoval jsem posunutí po dílcích vzdálených od sebe 0,2 mm a rozdíl naměřených sousedních hodnot odpovídal 20mV. Tedy přesnost na jednu desetinu milimetru odpovídá signálu o velikosti napětí 10mV, kterou jsem byl chopen zaznamenat pomocí osciloskopu.

Na navrženém obvodu jsem provedl měření v rozsahu 0 až 50mm. Výstupní charakteristika indukčnostního senzoru je v rozsahu udaným výrobcem lineární. Ale měření umožňuje senzor zasouvat ve větším rozsahu, což vede k zaoblení signálu, když posuvné jádro vysouvám ze senzoru až do úplného vysunutí. Výstupní charakteristika se zaoblí, až je výstupní napětí je rovno nule. Na obrázku 20 je obecná výstupní charakteristika LVDT senzoru.



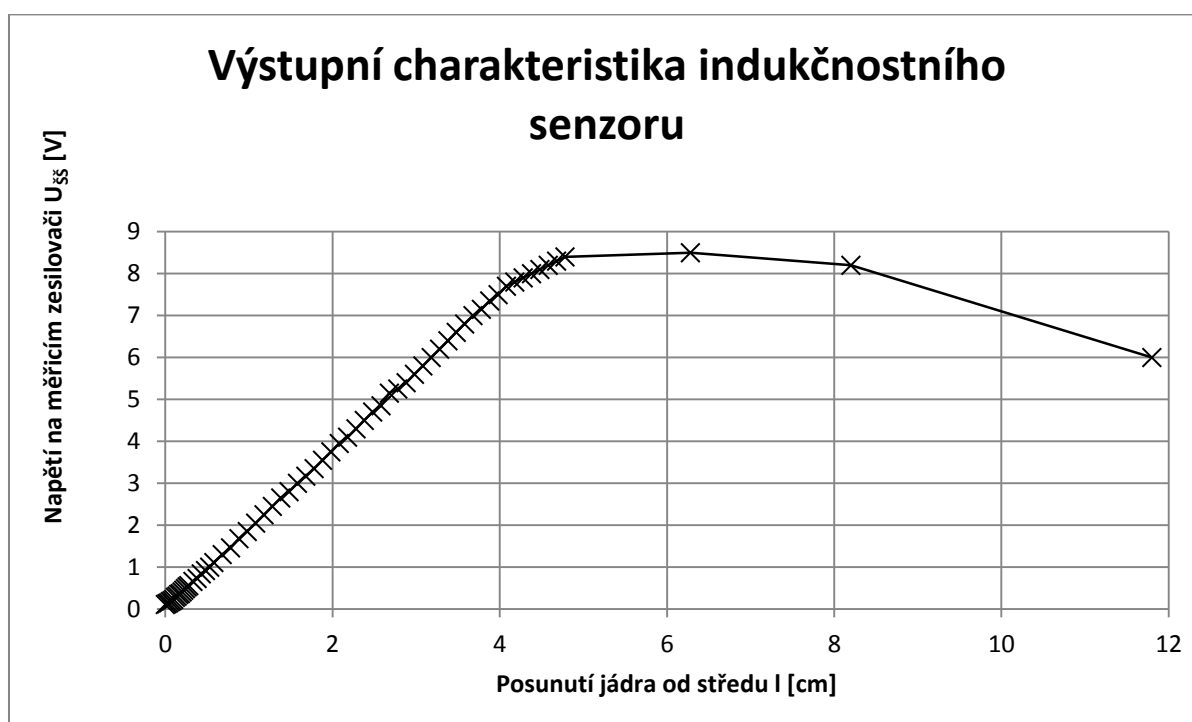
Obrázek 20: Výstupní charakteristika LVDT senzoru shodná s indukčnostním senzorem [6]

Naměřená data jsou obsažena v tabulce 3 a obrázku 1. Naměřená data jsou vyobrazena pouze v prvním kvadrantu charakteristiky, protože charakteristika ve třetím kvadrantu by byla jen s opačnými znaménky. Na naměřené charakteristice je vidět jak se chovají indukčnostní

senzory posunutí mimo měřený rozsah. Měříme výstupní napětí na jedné cívce ovlivněné magnetickým polem jádra.

Tabulka 3: Naměřena data z indukčnostního senzoru posunutí

U_{ss} [V]	0,4	2	4	6	8,2	8,5	8,4	8,3	8,2	8,1	8	7,9	7,8	7,7	7,5
l [cm]	18,3	16	14	11,8	8,2	6,28	4,78	4,68	4,58	4,48	4,38	4,28	4,18	4,08	3,98
7,35	7,15	7	6,8	6,6	6,4	6,2	6	5,8	5,6	5,4	5,25	5,15	4,85	4,7	4,5
3,88	3,78	3,68	3,58	3,48	3,38	3,28	3,18	3,08	2,98	2,88	2,78	2,68	2,58	2,48	2,38
4,3	4,1	3,95	3,75	3,55	3,35	3,17	3	2,8	2,65	2,45	2,25	2,05	1,85	1,68	1,46
2,28	2,18	2,08	1,98	1,88	1,78	1,68	1,58	1,48	1,38	1,28	1,18	1,08	0,98	0,88	0,78
1,3	1,11	1	0,92	0,84	0,73	0,66	0,56	0,53	0,49	0,45	0,41	0,37	0,35	0,31	0,28
0,68	0,58	0,53	0,48	0,43	0,38	0,33	0,28	0,26	0,24	0,22	0,2	0,18	0,16	0,14	0,12
0,23	0,2	0,18	0,15	0,13	0,11										
0,1	0,08	0,06	0,04	0,02	0										



Obrázek 21: Výstupní charakteristika indukčnostního senzoru posunutí

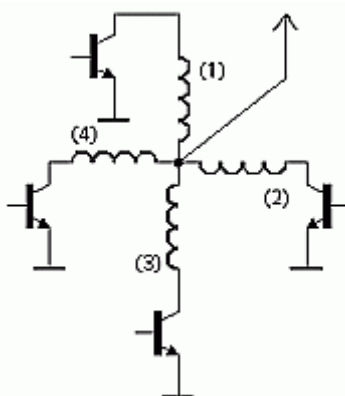
4. Návrh a realizace obvodů pro řízení krokového motoru

4.1. Krokové motory a jejich ovládání

Krokový motor je impulsně napájený motor, jehož funkční pohyb je nespojitý a děje se po jednotlivých úsecích (krocích). K řízení krokového motoru slouží ovladač krokového motoru. Ovladač krokového motoru řídí funkční pohyb a režimy chodu krokového motoru. Řídí jej tak, že budí fáze vinutí krokového motoru v jisté časové posloupnosti. Ovladač musí splnit dva požadavky. Jednak musí zajistit výkonové buzení fází motoru a dále vytvořit předepsanou časovou posloupnost buzení fází motoru. Ovladač se skládá z výkonové části a komutátoru. Výkonová část je obvykle tvořena výkonovými spínacími prvky, jejichž počet odpovídá počtu fází krokového motoru. Komutátor je elektronické zařízení, které na základě vstupních informací řídí spínání výkonových spínacích prvků tak, aby každému řídicímu impulsu odpovídalo natočení krokového motoru o jeden krok.

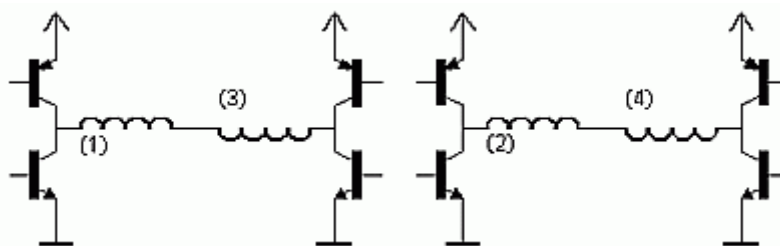
Mezi parametry krokových motorů patří počet kroků na otáčku. Jeden krok je definován jako reakce motoru na řídicí impuls. Krokový motor se pootočí o vzdálenost, kde je jeho poloha v magnetickém klidu. Dalším parametrem je úhel kroku. Je to úhel, o který se motor potočí při příchodu jednoho řídicího impulsu.

Řízení krokových motorů dělíme na unipolární a na bipolární. Při unipolárním řízení prochází proud v jednom okamžiku právě jednou cívkou. Motor s tímto buzením má nejmenší odběr, ale také poskytuje nejmenší krouticí moment. Výhodou tohoto řešení je jednoduché zapojení řídicí elektroniky, v podstatě stačí jeden tranzistor na každou cívku. Na obrázku 22 je vidět toto řízení.



Obrázek 22: Schéma unipolárního řízení krokového motoru

Při bipolárním řízení prochází proud vždy dvěma protilehlými cívkami. Ty jsou zapojené tak, že mají navzájem opačně orientované magnetické pole. Motor v tomto režimu poskytuje největší krouticí moment, ovšem za cenu vyšší spotřeby. Pro řízení jsou zapotřebí dva H-můstky, pro každou větev jeden. Schéma bipolárního řízení je na obrázku 22. H-můstek je tvořen čtyřmi tranzistory kde jejich spínáním a zavíráním budím magnetické pole, které je dvakrát silnější oproti unipolárnímu řízení.



Obrázek 23: Schéma bipolárního řízení

4.2. Návrh řídicího obvodu s procesorem

Přípravek, na kterém budou jednotlivé senzory vzdálenosti, má posuvné měřítko. K posuvnému měřítku jsou všechny senzory polohy přidělány. Jedním pohybem posuvného měřítka měním měřenou vzdálenost senzorů polohy. Toto měřítko je přes převody a lineární posun propojeno s krokovým motorem.

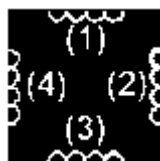
Jsem vybaven krokovým motorem M42SP-7, které vyrábí firma MITSUMI. Je to krokový motor se čtyřmi fázemi, který má vyveden jeden vodič z každé fáze, plus jeden vodič, který je pro všechny společný. Jedná se tedy o krokový motor, pro který je vhodné unipolární řízení. Úhel natočení jednoho kroku je $7,5^\circ$, což odpovídá 48 krokům na jednu otáčku motoru. Cívka každé fáze má elektrický odpor 50Ω . Tento motor je navržen pro napájecí napětí 12V. Tedy

z toho plyne, že proud procházející jednou cívkou je roven $I = \frac{U}{R} = \frac{12}{50} = 0,24A$. Kdyby byla

cívka zapojena jen přes tranzistor k zemnímu signálu, může dojít k proražení tranzistoru záporným napětím, které vznikne při vypínání cívky. Proto musíme buď tranzistor navrhnout na vyšší závěrné napětí, což vede ke koupi drahého tranzistoru, nebo k cívce připojíme diodu, která toto napětí vyzkratuje, čímž ochrání tranzistor. Dioda také způsobí rychlejší vypnutí cívky, čímž můžeme krokovat motor rychleji. Roztočení motoru provádím spínáním jednotlivých fází, v daném sledu za sebou. Podle druhu spínání je můžeme rozdělit:

- na jednofázové řízení, kde spínám vždy jen jednu fázi.
- na dvoufázové řízení, kde spínám pokaždé dvě fáze.
- na osmitaktní řízení, které je kombinací dvou předešlých druhů řízení

Na obrázku 24 jsou vyobrazeny 4 cívky a jejich rozložení. Na těchto cívkách si ukážeme jednotlivá taktování krokových motorů. V tabulce 4 je zobrazen sled zapínání a vypínání cívek pro daný druh řízení.



Obrázek 24: Rozložení cívek

sepnut. Softwarové odrušení jsem vyřešil časovačem, který vždy po 5ms vyvolá přerušení. V obsluze přerušení kontroluji tlačítka zda jsou zapnuta a zapisuji jejich stav dojednot' Byte paměti. Pokud je sepnut, hodnota v paměti je rovna 255. Nastane-li tato hodnota, mohu tlačítko prohlásit jako sepnuté a provádět další program. Tímto způsobem odrušuji všechna tlačítka v obvodu.

První tlačítko slouží pro pohyb motoru. Pokud toto tlačítko budu držet, krokový motor se pomalu rozjede na jednu stranu. Krokový motor řídím v osmitaktním režimu, tedy nastavuji 4 výstupy na kombinace popsané v tabulce 4. Tyto hodnoty mám uloženy v poli, protože se nemění. Poté jsem si vytvořil funkci, která nastaví staré výstupy do další nové sekvence výstupů tzv. krokovací funkce. Každým zavoláním této funkce se pohne krokový motor o jeden krok. Teď tuto funkci musím volat ve vhodnou dobu, aby se krokový motor plynule roztočil. Po vyhodnocení zda bylo stisknuto právě toto tlačítko, spustím odměřování času. Podle uplynulého času nastavuji pomocnou proměnnou na hodnotu, která je úměrná kmitočtu spínání krokového motoru. V přerušení počítám počet průchodů přerušení. Tuto hodnotu porovnávám s pomocnou proměnnou, pokud se hodnoty rovnají, otočím motorem o jeden krok zavoláním krokovací funkce a vynuluji počet průchodů přerušovací funkcí, aby mohl znovu počítat dobu do dalšího kroku. S růstem měření času se pomocná proměnná zmenšuje, což vede ke zrychlení krokování motoru. Pustím-li první tlačítko, zastavím tím odměřování času a tím zastavím krokový motor.

Druhé tlačítko slouží pro změnu směru otáčení krokového motoru. Změnu směru provedu tím, že začnu na výstup posílat předešlou hodnotu výstupu. Budu projíždět pole s kombinacemi výstupů, která je popsána v tabulce 4, opačným směrem. Po vyhodnocení stisknutí tlačítka zavolá funkci změna směru, která nastavuje konstantu v krokovací funkci. V parametru krokovací funkce je předání směru, podle tohoto parametru se bude motor otáčet na danou stranu. Při stisknutí tohoto tlačítka se motor zastaví a poté zase rozjede.

Třetí a čtvrté tlačítko plní podobnou funkci jako tlačítko druhé jen s tím, že souží jako dorazy pro krokový motor. Při indikaci stisknutí tohoto tlačítka se motor zastaví a změní se směr točení krokového motoru.

4.4. Napájecí zdroj pro přípravek

Napájecí zdroje můžeme rozdělit do dvou základních skupin, a to na zdroje lineární a zdroje spínané. Ve své práci jsem použil lineární síťový zdroj. Lineární síťové zdroje jsou lineárně stabilizované. Pro vytvoření takového zdroje potřebujeme transformátor, který transformuje síťové napětí na nižší napětí. Po transformaci provádíme usměrnění pomocí usměrňovacích můstku nebo diod. Dále usměrněný signál musíme filtrovat. Filtraci provádím lineárním regulátorem napětí.

Obrázek 26: Navržený zdroj

Shrnutí

Během výroby a testování vyrobených přípravků jsem narazil na chyby, které vedli k nesprávné funkčnosti. Přípravky nebyly vyráběny profesionálně ale vlastnoruční výrobou. Při sestavování jednotlivých zařízení jsem narazil na několik problémů, které bylo potřeba vyřešit pro správný chod zařízení:

- Prvním problémem byl detekován u prvních konstrukcí ultrazvukového senzoru vzdálenosti. Na straně přijímače bylo použito místo schmittových klopných obvodů zesilovačů. Zesilovače měli funkci napěťových komparátorů s referenčním zdrojem, čímž jsem zavedl hysterezi. Nevýhodou tohoto zapojení bylo moc velké zesílení, které zesilovalo šum. Šum svou velikostí předčasně nastavoval výstup a nebylo schopné určit, který signál je platný. Tento problém jsem odstranil schmittovým klopným obvodem, který se nastavil výstup do jedničky, překonal-li vstupní signál napěťovou úroveň 2,3V.
- Dalším problémem bylo odstranění rušení mezi obvody, které měří vzdálenost a mezi obvody pro ovládání krokového motoru. Když tyto obvody byli připojeni ke stejnému zdroji napětí, docházelo vlivem spínání krokových motorů k poklesu napájecího napětí. To ovlivňovalo napájení procesoru a napájení senzorů vzdálenosti. Řešením bylo rozdělit zdroj na dvě sekce. Jedna pro napájení úlohy krokového motoru a na napájení senzorů polohy. Obě dvě sekce mají svůj vlastní usměrňovač, čímž jsou od sebe odděleny. Jsou zde tedy dva zemní signály, které se nesmí propojit.
- Poslední problém byl na indukčním senzoru, který byl v původním plánu konstruován s výstupem, jehož hodnota stejnosměrného napětí by odpovídala měřené vzdálenosti. Problém nastal ve filtraci měřené signálu, který se velmi pomalu měnil, což bylo způsobeno velkou kapacitou kondenzátoru. To způsobilo, že bychom při měření museli čekat na ustálení hodnoty a při nižší velikostech kapacity vznikalo na výstupu nežádoucí zvlnění. Signál, který se fituje pro měření není vhodný, protože měřené napětí prochází nulou. Jedná se o usměrněný signál. Tento problém byl odstraněn změnou v měření. Výstupní signál odpovídá signálu z LVDT senzoru.

Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit výukový modul pro měření vzdálenosti, který bude používán jako názorný příklad při cvičení na předmětu Měřicí technika 2 Měření neelektrických veličin. Seznámit se s možnými principy měření vzdálenosti a vypracovat na toto téma řešení. Dále jsem se zabýval návrhem a realizací senzorů vzdáleností.

V práci byly teoreticky studovány senzory vzdálenosti, které se využívají v hlavně průmyslových aplikacích. Pro vybrané senzory vzdálenosti jsem navrhl a zkonstruoval obvody, které převádějí a přizpůsobují výstupy ze senzoru na napěťové výstupy. Na těchto výstupech je možné pomocí osciloskopu provádět měření. Senzory jsou namontovány na přípravku s veškerou elektronikou potřebnou pro vytvoření samostatné úlohy. Do úlohy patří ultrazvukový a indukčnostní senzor polohy s retenčním odporovým senzorem, napájecí zdroj a řídicí obvod krokového motoru.

Práce byla napsána tak, aby čtenáři poskytla potřebné vědomosti o senzorech vzdálenosti, jejich metodami měření a jejich návrhu. Věřím, že přípravek z této bakalářské práce bude hojně využíván.

Citovaná literatura

- [1] JEDLIČKA, Petr. *Přehled obvodů řady CMOS 4000* - 2. díl, nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 1996-2005, ISBN 80-7300-168-3. Dostupný z WWW: <<http://gmelectronic.eu/kte/0597.pdf>>. ISSN 1210-6305.
- [2] JELINEK, Jiří. *Měření fyzikálních veličin*. Liberec : Přednášky TUL, 2012.
- [3] MAŠIKA, Pavel. *Ultrazvukový dálkoměr*. KTE magazín. 1997, 97, 5, s. 32-35. Dostupný také z WWW: <<http://gmelectronic.eu/kte/0597.pdf>>. ISSN 1210-6305
- [4] VOJÁČEK, Antonín. Lankové snímače - elektromechanické měření vzdálenosti: snímač Kubler. [online]. 11. Květen 2008. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/lankov%C3%A9-sn%C3%ADma%C4%8De-elektromechanick%C3%A9-m%C4%9B%C5%99en%C3%AD-vzd%C3%A1lenosti>
- [5] KABEŠ, Karel. Magnetostrikční snímače vzdálenosti. *Automa* [online]. 2007, č. 04 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34229
- [6] BENEŠ, Petr, et al. *Měření fyzikálních veličin : návody do laboratorních cvičení* [online]. Brno : [s.n.], 10.5.2013 [cit. 2013-11-23]. Dostupné z WWW: <www.vutbr.cz>.
- [7] KOLÁŘ, Milan. *Analogová elektronika*. Liberec : Přednášky TUL, 2012.
- [8] TKOTZ, Klaus, et al. *Příručka pro elektrotechniku*. 2. doplněné vydání. Praha : EUROPA-SOBOTÁLES, 2006. 623 s. ISBN 80-86706-13-3.
- [9] MATOUŠEK, David. *BEN-TECHNICKÁ LITERATURA. C pro mikrokontroléry PIC*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literartura, 2011. ISBN 978-80-7300-413-2.