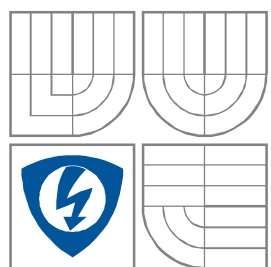


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SENZOR PRO SNÍMÁNÍ RYCHLÝCH JEDNORÁZOVÝCH DĚJŮ

SENSOR FOR SENSING OF THE ONE-TIME FAST EVENTS

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE
SEMESTRAL THESIS

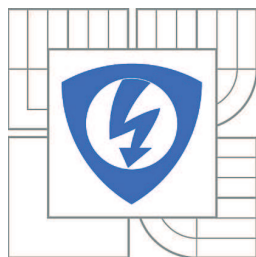
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADEK KOČÍ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. STANISLAV KLUSÁČEK

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Radek Kočí

ID: 125482

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Senzor pro snímání rychlých jednorázových dějů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce bude nové uspořádání senzoru pro snímání rychlých jednorázových dějů. Na základě semestrální práce a seznámení se s problematikou měření rychlosti pohybujících se objektů, prostudujte principy stávajících metod a navrhnete nové uspořádání senzoru na indukčnostním principu. Navrhnete obvodové řešení pro přizpůsobení signálu ze snímače. Na základě návrhu realizujte experimentální provedení snímače a ověřte měřením jeho možnosti a parametry. Práce bude realizována ve spolupráci s firmou PROTOTYPA a.s. a UTEE VUT v Brně.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DĚDKOVÁ, Jarmila ; DĚDEK, Libor. Elektromagnetismus. 1. vydání. Brno : VUT Brno, 1998. 229 s. ISBN 80-214-1106-6.

[2] ĎAĎO, S. - KREIDL, M.: Senzory a měřicí obvody. 1. vydání Praha : ČVUT v Praze 1996. 315 s. ISBN 80-01-01500-9.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 28.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Klusáček

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V práci je proveden rozbor a porovnání aktuálně používaných metod pro měření rychlosti pohybujících se předmětů. Jedná se především o metody optické a elektromagnetické. V praktické části je proveden návrh nového uspořádání elektromagnetického senzoru na indukčnostním principu pomocí modelování v programu FEMM, přes praktické sestavení a ověření funkčnosti.

Klíčová slova

Projektíl, měření rychlosti, optická hradla, elektromagnetická hradla.

Abstract

In this thesis are analyzed and compared currently used methods for measuring the speed of moving objects. These are primarily optical and electromagnetic methods. In the practical part is made a design of a new electromagnetic sensor arrangement on the inductive principle using modeling in program FEMM, through the compilation and verification of practical functionality.

Keywords

Projectile, velocity measurement, optical gates, electromagnetic gates.

Bibliografická citace:

KOČÍ, R. *Senzor pro snímání rychlých jednorázových dějů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 51s. Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Stanislav Klusáček.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Senzor pro snímání rychlých jednorázových dějů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji konzultantovi bakalářské práce Ing. Martinu Friedlovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji panu Ing. Bohumilu Královi za umožnění měření v prostorách firmy PROTOTYPA a.s.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Princip měření rychlosti	10
3	Chyby měření [2].....	11
3.1	Chyby způsobené geometrií	11
3.1.1	Chyba měření báze	11
3.1.2	Chyba trajektorie	11
3.1.3	Chyba rovnoběžnosti hradel.....	12
3.2	Chyby měření času	12
4	Metody měření rychlosti	13
4.1	Optické metody.....	13
4.1.1	Diodová hradla	13
4.1.2	Laserová hradla	14
4.1.3	Sky-screen hradla	15
4.2	Magnetoelektrické metody	16
4.2.1	Měření pomocí jedné cívky a zmagnetizovaného projektilu.....	16
4.2.2	Měření pomocí dvou cívek a zmagnetizovaného projektilu.....	17
4.2.3	Pomocí primárního a sekundárního vinutí	18
4.3	Další metody.....	19
4.3.1	Dopplerův měřící radar	19
5	Návrh senzoru.....	20
5.1	Konstrukce hradla.....	20
5.1.1	Určení rozměrů snímací cívky	21
5.1.2	Realizace snímací cívky	25
5.2	Zapojení hradla	26
5.2.1	Návrh rezonančního můstku.....	26
5.2.2	Realizace rezonančního můstku	29
5.3	Ověření funkčnosti hradla.....	31
5.4	Realizace snímače.....	35
6	Ověření vlastností senzoru	36
6.1	Ověření funkčnosti senzoru	36
6.1.1	Střela č.1	38
6.1.2	Střela č.2.....	40
6.1.3	Střela č.3.....	41

6.2	Porovnání senzoru s profesionálním řešením	42
6.2.1	Umístění hradel 2 m od sebe	42
6.2.2	Umístění hradel 20 cm od sebe	44
7	Závěr.....	45

1 ÚVOD

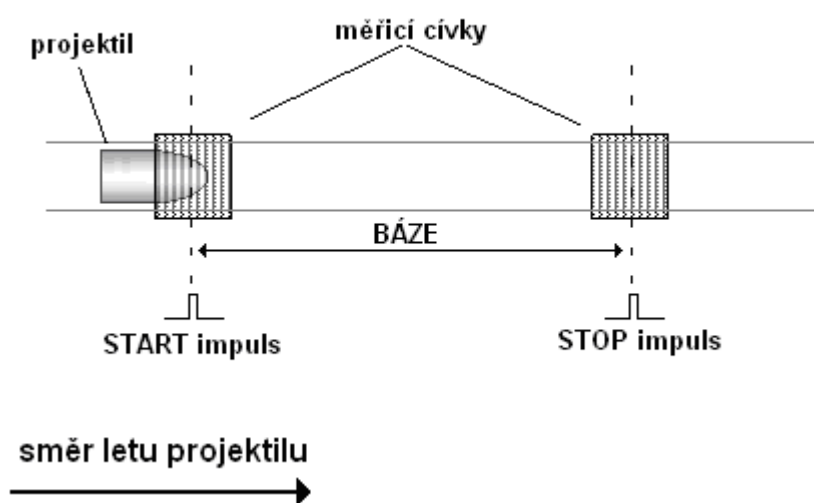
Bakalářská práce vychází ze zadání projektu “Speciální senzory pro snímání rychlých jednorázových dějů“ v rámci projektu IET 2. Cílem projektu bylo seznámení se s aktuálními metodami měření rychlosti střely využívaných v praxi, především ve firmě PROTOTYPA a.s., a sestavení nového uspořádání senzoru na indukčnostním principu.

Potřeba vyvinutí nové magnetoelektrické měřicí metody je dána omezenými možnostmi použití stávajících hradel, kterými není možné měřit ústřovou rychlost střely. Jedná se především o měření rychlosti projektilů, které mají simulovat odlétávající úlomky po výbuchu. Tyto úlomky však velmi rychle ztrácí svou rychlost a je tedy nutné provést měření co nejbližší ústí hlavně. Optické metody však musí být kvůli parazitnímu osvětlení od ústřového plamene umístěny v určité vzdálenosti od hradla a nedovolují tato měření. Tuto nevýhodu odstraňují právě elektromagnetická hradla.

2 PRINCIP MĚŘENÍ RYCHLOSTI

V případě měření rychlosti pohybujících se objektů se rychlost měřeného předmětu určuje pomocí měření polohy a času. Pro určení rychlosti je tedy nutné detekovat polohu objektu na začátku a konci měřeného úseku a čas, za který objekt měřený úsek překoná.

Pro detekci projektilu se využívá dvou rovnoběžných hradel (bran), které jsou navzájem umístěny v přesně definované vzdálenosti, která se nazývá báze, dle obr. 2.1. Projektil musí projít prvním i druhým hradlem, proto je nutné, aby byly umístěny přesně za sebou a byly navzájem rovnoběžné.



Obr. 2.1 - Měření rychlosti pomocí hradel

Pomocí hradel se získají dva pulsy, které indikují průchod projektilu prvním resp. druhým hradlem, jedná se o START a STOP impulsy. Tyto impulsy se využívají pro rozběhnutí a následné zastavení rychlého čítače, kterým je odměřen čas doby průletu projektilu hradly. Ze známé velikosti báze l a doby průletu projektilu t je za pomoci vztahu 2.1 možné získat hodnotu průměrné rychlosti v letu projektilu na vzdálenosti dané bází snímače.

$$v = \frac{l}{t} \quad [\text{m.s}^{-1}; \text{m, s}] \quad (2.1)$$

3 CHYBY MĚŘENÍ [2]

Chyby měření rychlosti za pomoci hradel se dělí na dvě základní skupiny. Jsou to chyby způsobené geometrií a měřením času. Tyto chyby různě ovlivňují výslednou hodnotu rychlosti měřeného objektu, jelikož ovlivňují hodnotu velikosti báze resp. změřený čas. Výsledná chyba je dána součtem těchto dvou základních chyb.

3.1 Chyby způsobené geometrií

Tyto chyby jsou svázány s délkou báze, délku báze l tedy můžeme přepsat do následujícího tvaru:

$$l = l_0 \pm \Delta l_0 \quad [\text{m}; \text{m}, \text{m}] \quad (3.1)$$

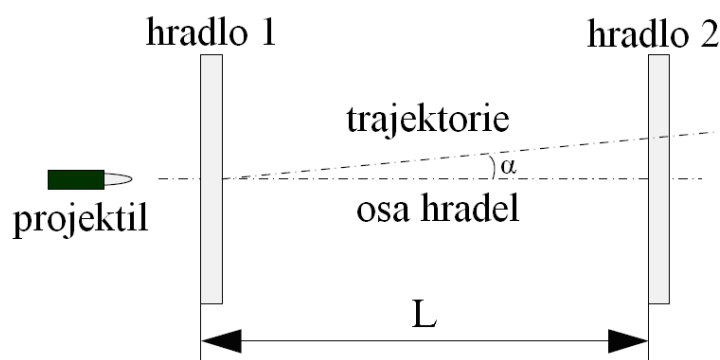
kde l_0 je délka báze a Δl_0 je absolutní chyba délky báze, která je dána součtem dílčích chyb.

3.1.1 Chyba měření báze

Základní geometrickou chybou je chyba měření báze, ta je způsobena tím, že není možné přesně změřit vzdálenost mezi měřicími hradly.

3.1.2 Chyba trajektorie

Tato chyba se váže na trajektorii průletu projektilu hradly, kdy se ve výpočtu předpokládá průlet projektilu kolmo na rovinu hradel. V praxi však nelze zaručit kolmou trajektorii, tudíž se dráha průletu projektilu bude od osy hradel odklánět o určitý úhel α .



Obr. 3.1 - Chyba trajektorie (převzato z [2])

Délka trajektorie je popsána vztahem 3.2.

$$L_T = \sqrt{L^2 + \Delta d^2} \quad [\text{m}; \text{m}, \text{m}] \quad (3.2)$$

kde

$$\Delta d = L \cdot \text{tg} \alpha \approx L \cdot \alpha \quad [\text{m}; \text{m}, -] \quad (3.3)$$

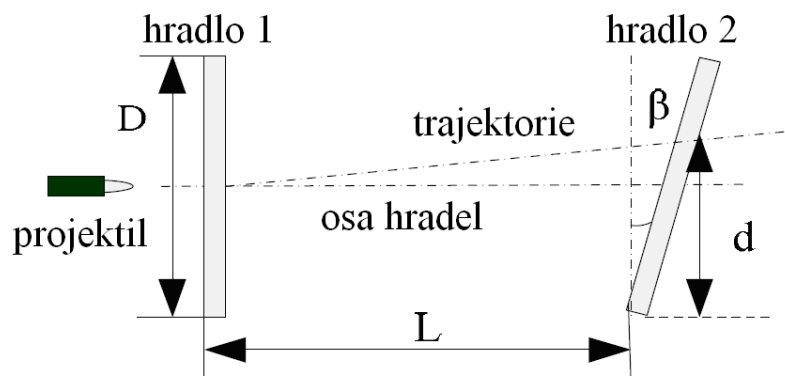
Výsledná chyba je dána rozdílem délky báze a trajektorie dle rovnice 1.5.

$$\Delta L_T = \sqrt{L^2 + \Delta d^2} - L \quad [\text{m}; \text{m}, \text{m}, \text{m}] \quad (3.4)$$

3.1.3 Chyba rovnoběžnosti hradel

V tomto případě dochází k nedodržení podmínky rovnoběžného umístění hradel, rovina jednoho z hradel je oproti druhému vychýlena o určitý úhel β , vzdálenost mezi hradly je tedy proměnná v závislosti na místě průletu projektilu .

Vznik chyby je znázorněn na obr. 3.5, kde D představuje rozměr hradla, L báze a d vzdálenost místa průletu projektilu od hrany hradla.



Obr. 3.2 - Neparalelní hradla (převzato z [2])

Matematické vyjádření chyby rovnoběžnosti je zapsáno vztahem 1.6

$$\Delta L_R = d \cdot \text{tg} \beta \approx d \cdot \beta \quad [\text{m}; \text{m}, -] \quad (3.5)$$

3.2 Chyby měření času

Chyby měření času jsou dány především tím, s jakou rozlišitelností je možné měřit časový úsek mezi START a STOP pulsem, a případným zpožděním signálu v elektronice snímače. Tyto chyby se vzhledem k aktuální přesnosti, s jakou je možné měřit časový úsek v konečné chybě měření uplatňují mnohem méně než chyby geometrické.

4 METODY MĚŘENÍ RYCHLOSTI

Hradla pro měření rychlosti projektilu jsou založena na dvou hlavních principech, optickém a elektromagnetickém. Na každém principu je založeno několik typů hradel. Tyto typy budou v následujícím textu popsány včetně jejich výhod i nevýhod.

4.1 Optické metody

Optické metody vyhodnocují stín od letícího předmětu, kterým je vyhodnocena jeho poloha a tedy protnutí hradla. Tyto metody jsou velice univerzální díky nezávislosti na materiálu a velikosti měřeného objektu.

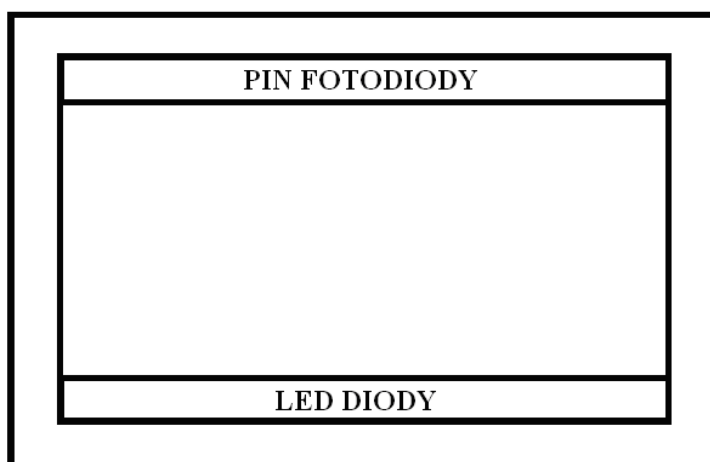
Obecným problémem optických metod jsou parazitní zdroje světla, které ovlivňují vřazený stín projektilem. Z tohoto důvodu nemůže být optických metod využito pro měření úst'ové rychlosti střely, kdy dochází k ovlivnění úst'ovým plamenem po výstřelu.

4.1.1 Diodová hradla

U diodových hradel je zdrojem světla řada LED diod umístěných dle obr. 4.1. LED diodami je vytvořena optická plocha, která je pomocí stínítka zúžena na co nejmenší tloušťku. Když tuto plochu letící předmět protne, dojde k vytvoření stínu. Proti LED diodám je umístěna řada rychlých PIN fotodiod, které slouží k zachycení vytvořeného stínu.

Umístění snímacích PIN diod v horní části hradla snižuje ovlivnění měření okolními zdroji světla, jelikož nosný rám vytváří pro světlo dopadající shora na PIN fotodiodách stín, tudíž nedochází k ovlivnění měřeného světelného toku od LED diod umístěných ve spodní části rámu.

Hradla jsou schopna měřit letící předměty o rychlosti 50 – 2000 m.s⁻¹.



Obr. 4.1 - Schéma hradla



Obr. 4.2 - Diodové hradlo fy Werner Mehl (převzato z [4])

4.1.2 Laserová hradla

Konstrukce laserových hradel je totožná s diodovými. Hradlo je opět tvořeno rámem na jehož horní části je řada PIN fotodiod pro snímání světelného paprsku. Světelný paprsek však v tomto případě není vytvořen řadou LED diod, ale za pomoci laseru.

Paprsek laseru je sám o sobě bodový zdroj světla, je tedy nutné ho za pomoci optické soustavy vychylovat a vytvořit souvisle osvětlenou plochu. V tomto případě bude vytvořená plocha trojúhelníková je tedy nutné, aby měřený objekt prolétl touto plochou.

Použitý laserový paprsek bývá ve viditelném spektru z bezpečnostních důvodů, aby bylo při pohledu na hradlo rozpoznatelné zda je v provozu a nedošlo k případné nehodě.

Hradlo je schopné měřit letící předměty o rychlosti $50 - 2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 4.3 - Laserové hradlo fy Prototypa (převzato z [6])

4.1.3 Sky-screen hradla

Hradla typu Sky-screen jsou určena především pro venkovní použití, jelikož jako zdroj světla využívají denní světlo. Pro správnou funkčnost musí intenzita osvětlení být alespoň 1500 lx, jinak není zaručena správná funkčnost hradla. Pro použití v interiérech je nutné použít správného osvětlení, aby nedocházelo k stroboskopickému efektu.

Základními prvky hradla jsou optické čočky, filtrační štěrbinu, fotodetekční prvky a vyhodnocovací obvody. Pomocí optických čoček lze získat informaci o letícím objektu i na velké vzdálenosti, což je klíčové pro hradlo tohoto typu. Štěrbínou se formuje detekční obraz. Když objekt prolétne detekčním obrazem, fotodetekční prvky zjistí kolísání světelného signálu a generují puls.

Hradlem je možné měřit rychlosti v rozsahu $50 - 2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Měřitelný kalibr střely je od 4 mm do 155 mm.



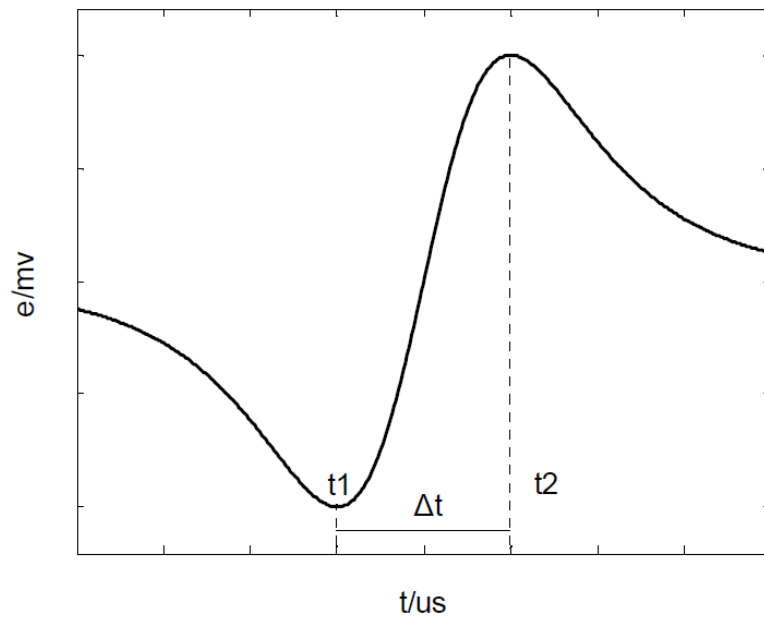
Obr. 4.4 - Sky-screen hradlo fy HPI (převzato z [7])

4.2 Magnetoelektrické metody

Magnetoelektrické metody využívají především cívek, jejichž vlastnosti jsou průchodem projektilu ovlivněny, nebo je v nich indukováno napětí.

4.2.1 Měření pomocí jedné cívky a zmagnetizovaného projektilu

Tato metoda využívá magnetické indukce ke generování pulsu při průchodu projektilu cívkou. Kolem zmagnetizovaného projektilu se vyskytuje statické magnetické pole, při průchodu projektilu měřicí cívkou se tedy úměrně s rychlostí projektilu bude toto pole v okolí cívky měnit. Díky této změně pole se na měřicí cívce naindukuje napětí úměrné rychlosti změny magnetického pole, tedy rychlosti projektilu.

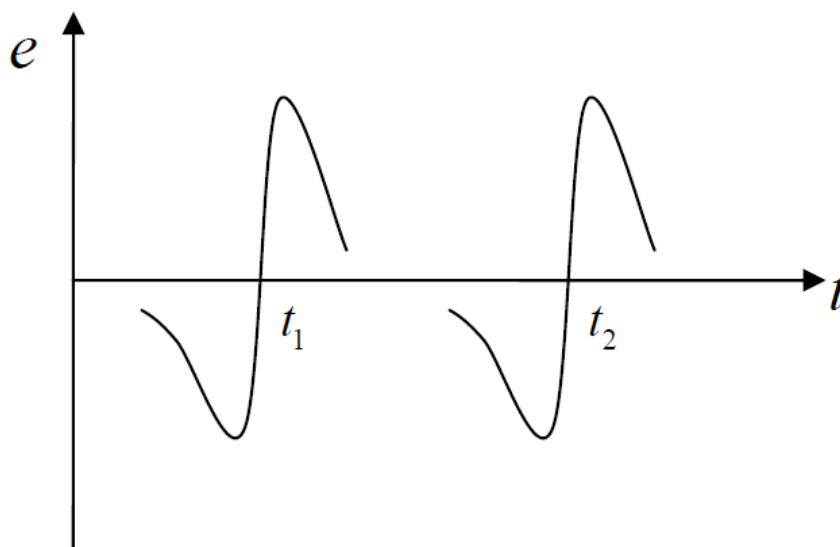


Obr. 4.5 - Průběh indukovaného napětí (převzato z [8])

Určení rychlosti projektilu se provádí na základě průběhu indukovaného napětí. Jednotlivé extrémy průběhu odpovídají umístění projektilu v prostoru. Vzdálenost mezi extrémy můžeme označit jako vzdálenost odpovídající poloměru měřicí cívky. Ze známého poloměru cívky a a době mezi extrémy Δt se určí výsledná rychlost projektilu.

4.2.2 Měření pomocí dvou cívek a zmagnetizovaného projektilu

Tato metoda vychází z předchozí metody, která určovala rychlost pomocí jedné cívky, v tomto případě jsou použity dvě cívky. Opět se využívá indukce napětí v měřicích cívkách, jiný je pouze způsob vyhodnocení.



Obr. 4.6 - Průběh indukované napětí při měření dvěma cívkami (převzato z [8])

Vyhodnocení probíhá také z časových průběhů, tentokrát se ale prostorově umístí uje bod, kdy časový průběh indukovaného napětí protíná nulovou osu. Tento bod v reálném prostoru odpovídá středu cívky. Jestliže známe vzdálenost středů obou měřicích cívek a čas mezi průchody nulou, můžeme určit průměrnou rychlost střely na tomto úseku.

Pro co nejpřesnější měření je důležité, aby signály z měřicích cívek byly stejné, pouze časově posunuté tzn. že při položení průběhů na sebe dojde k jejich splynutí.

4.2.3 Pomocí primárního a sekundárního vinutí

Jedno hradlo se skládá ze dvou cívek, primární a sekundární. Primární cívka je napájena stejnosměrným napětím a v jejím okolí se vytvoří statické magnetické pole. Sekundární cívka je umístěna vedle primární cívky, tudíž je umístěna v magnetickém poli primární cívky. V klidovém stavu je pole primární cívky konstantní takže nedochází k jeho časové změně a v sekundární cívce se neindukuje žádné napětí.



Obr. 4.7 - Elektromagnetické hradlo fy Kaman (převzato z [9])

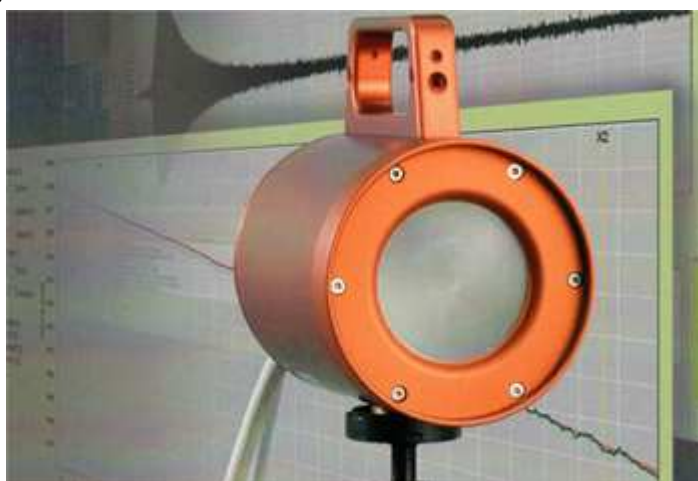
Při průletu projektilu hradlem se v projektilu díky změně velikosti magnetického pole (se vzrůstající vzdáleností od primární cívky slábne) indukují vířivé proudy, které

kolem projektilu vytváří pole, které působí proti poli primární cívky. Magnetické pole v prostoru sekundární cívky se začne díky poli prolétajícího projektilu měnit a dojde k indukci napětí na sekundární cívce. Napětí indukované na sekundární cívce je využito ke generování impulsu.

4.3 Další metody

4.3.1 Dopplerův měřicí radar

Dopplerův měřicí radar využívá k měření tzv. Dopplerův jev. Dopplerův jev popisuje změnu frekvence signálu v závislosti na pohybu objektu. V našem případě je radarem vyslán paprsek o určité frekvenci směrem k letícímu projektilu, od kterého se odrazí. Odražený paprsek má však v závislosti na rychlosti letícího objektu jinou frekvenci. Rozdíl frekvencí vysílaného a odraženého paprsku se následně vyhodnocuje a převádí na rychlost střely.



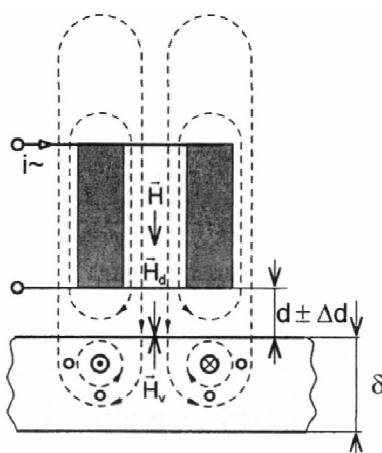
Obr. 4.8 - B481 Dopplerův radar fy HPI (převzato z [7])

Dopplerův radar umožňuje měření rychlosti střely na celé trajektorii střely tzv. mapování. Použití radaru je možné ve vnitřních i vnějších prostorech. Měření je možné pro projektily od ráže 3 mm od vzdáleností v řádech mm do pár desítek metrů. Měřené rychlosti se pohybují v rozmezí $20 - 3000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

5 NÁVRH SENZORU

Vzhledem k tomu, že se měření rychlosti pohybujících se předmětů převádí na měření polohy, byl pro návrh hradla využit princip vířivých proudů známý z indukčnostních senzorů polohy.

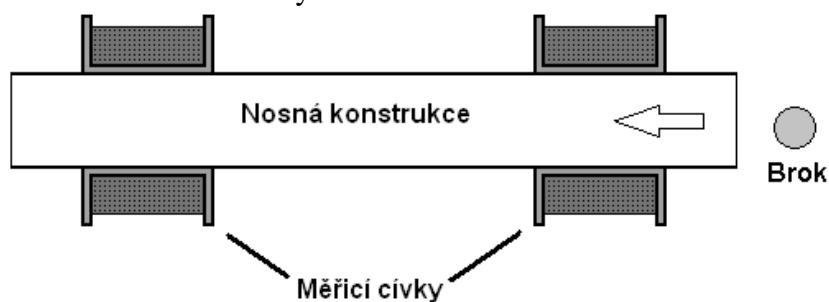
Princip indukčnostních snímačů s potlačeným magnetickým polem spočívá v potlačování magnetického pole snímače magnetickým polem vířivých proudů dle obr. 5.1. Do střídavého pole snímače s intenzitou H je vložen elektricky vodivý a magneticky nevodivý materiál (diamagnetický). V tomto materiálu se působením pole snímače indukují vířivé proudy, které ve svém okolí vytváří magnetické pole s intenzitou H_V , které dle Lenzova zákona působí proti poli, jímž bylo vyvoláno.



Obr. 5.1 - Indukčnostní snímač s potlačeným magnetickým polem (převzato z [10])

5.1 Konstrukce hradla

Samotné hradlo obsahuje cívku navinutou na plastové trubičce, kterou se pohybuje měřený projektil dle obr. 5.2. Tato cívka je napájena střídavým signálem, díky němuž v okolí hradla vzniká střídavé magnetické pole. Při pohybu kovového projektilu hradlem dojde díky tomuto poli k vytvoření vířivých proudů uvnitř projektilu. Indukované vířivé proudy v okolí projektilu vybudí indukované magnetické pole, které působí proti poli, jímž bylo vyvoláno. Interakcí primárního a indukovaného pole dojde ke změně vlastní indukčnosti cívky hradla.



Obr. 5.2 - Uspořádání senzoru (řez)

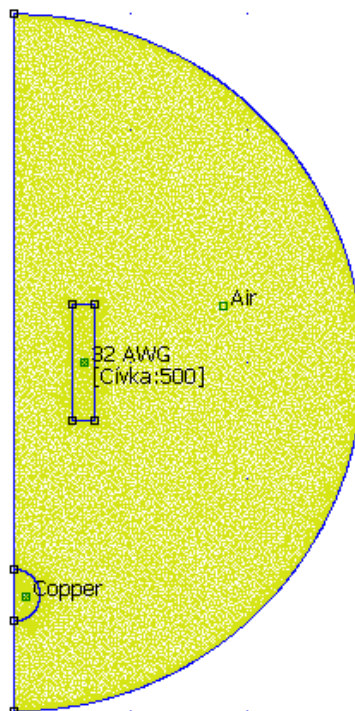
5.1.1 Určení rozměrů snímací cívky

Pro určení rozměrů cívky byly využity simulace z programu FEMM. Program FEMM umožňuje simulaci a vyšetřování magnetických a elektrostatických polí a tepelných a proudových toků. FEMM pro simulace využívá metodu konečných prvků (MKP).

Pomocí modelů byla sledována změna vlastní indukčnosti cívky v závislosti na poloze měděného broku. Měděným brokem byl nahrazen brok olověný z důvodu chybějící definice olova v materiálové knihovně programu. Měď byla použita z důvodu blízké hodnoty permeability mědi a olova (0,999992 resp. 0,999983).

Samotný model byl typu axysymmetric, kdy nakreslený model rotuje kolem vertikální osy r . Z nakresleného obdélníku se tedy stane prstenec, který představuje válcovou cívku hradla. Pro řešení modelu byla zvolena frekvence 100 kHz, což byla předpokládaná pracovní frekvence skutečného hradla. Proud cívkou byl zvolen 200 mA.

Postupně bylo vytvořeno několik modelů cívky s různými rozměry. Simulovány byly cívky s vnitřním průměrem 6, 10, 15 a 20 mm, a různou šířkou vinutí. Všechny simulované cívky byly navinuty měděným drátem AWG32 (průměr 0,202 mm) a obsahovaly 500 závitů. Geometrický model cívky o poloměru 10 mm a délkou vinutí 10 mm je uveden na obr. 5.3.



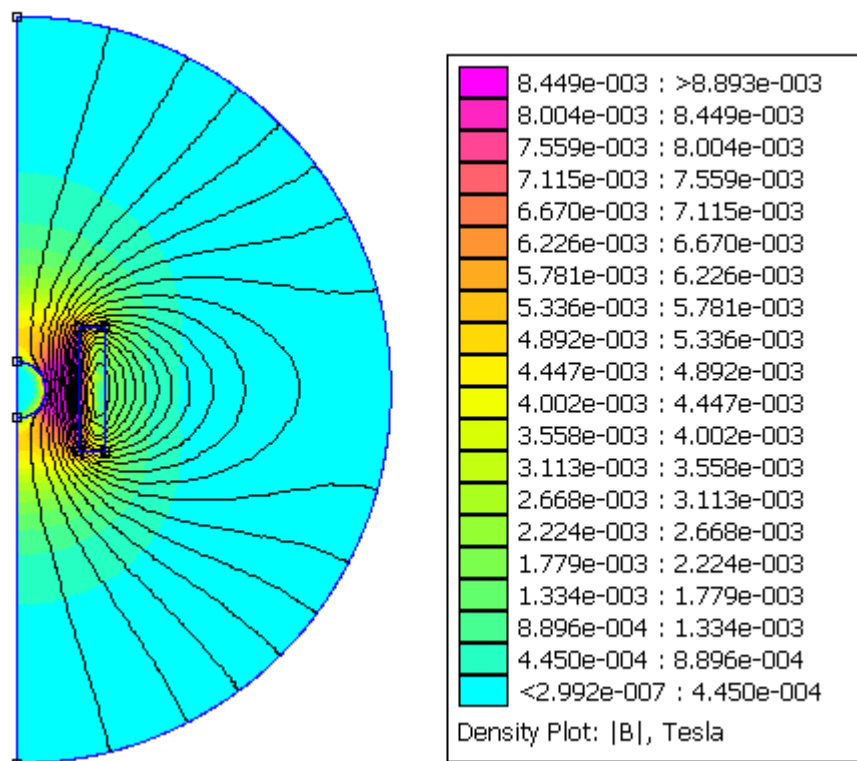
Obr. 5.3 - Model cívky s generovanou mřížkou

Pro usnadnění práce s modelem byl vytvořen krátký skript v jazyce Lua, jenž je programem FEMM podporován. Pomocí skriptu byl postupně posouván brok v ose cívky s krokem 1 mm. V každém kroku byla spuštěna simulace a do konzole byly

vypsány základní vlastnosti cívky, konkrétně proud I , napětí U a tok Φ . Z magnetického toku Φ a proudu cívkou I byla následně získána vlastní indukčnost cívky L dle vztahu:

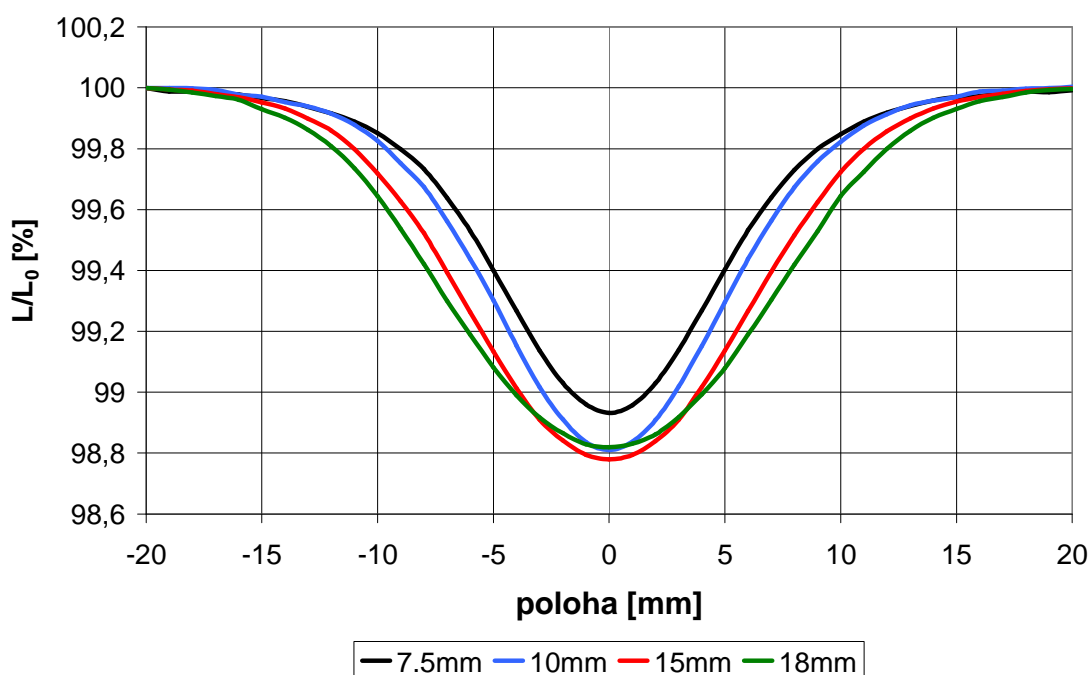
$$L = \frac{\Phi}{I} \quad [\text{H}; \text{Wb}, \text{A}] \quad (5.1)$$

Příklad výsledku simulace pro model cívky dle obr. 5.3 s umístěním projektilu uprostřed vinutí cívky je zobrazen na obr. 5.4.

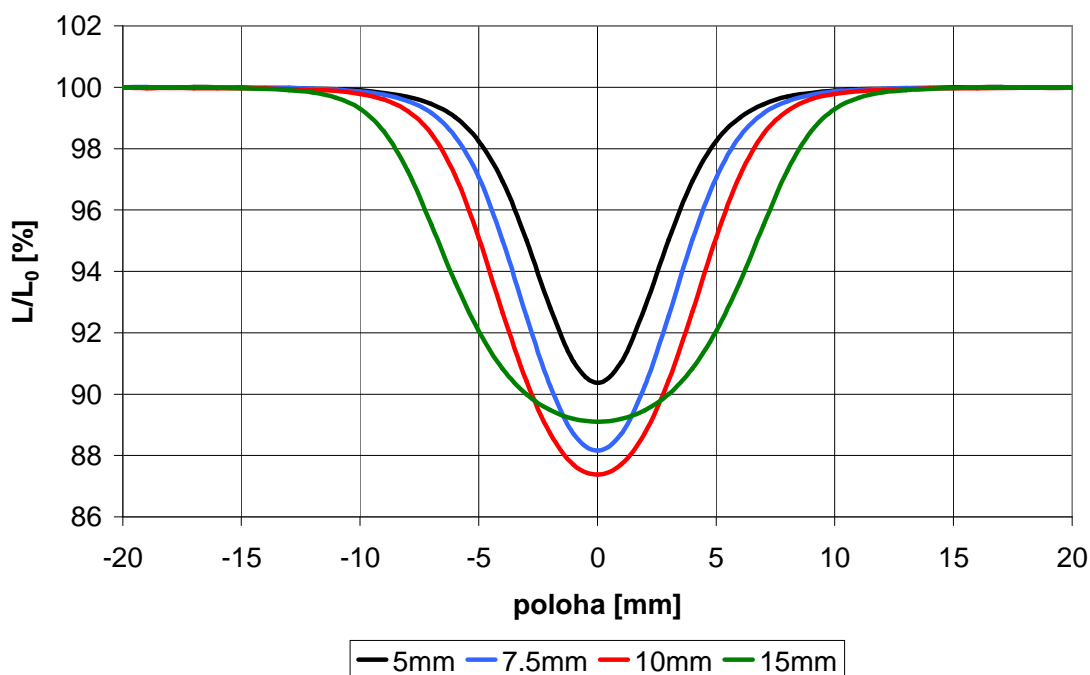


Obr. 5.4 – Výsledek simulace

Pro potřeby porovnání jsou výsledné průběhy velikosti indukčnosti L jednotlivých modelů uvedeny v poměrovém tvaru vztaženém k indukčnosti cívky bez vloženého projektilu L_0 . Výsledné průběhy pro cívky s poloměrem 16 a 6 mm jsou zobrazeny na obr. 5.5 resp 5.6.



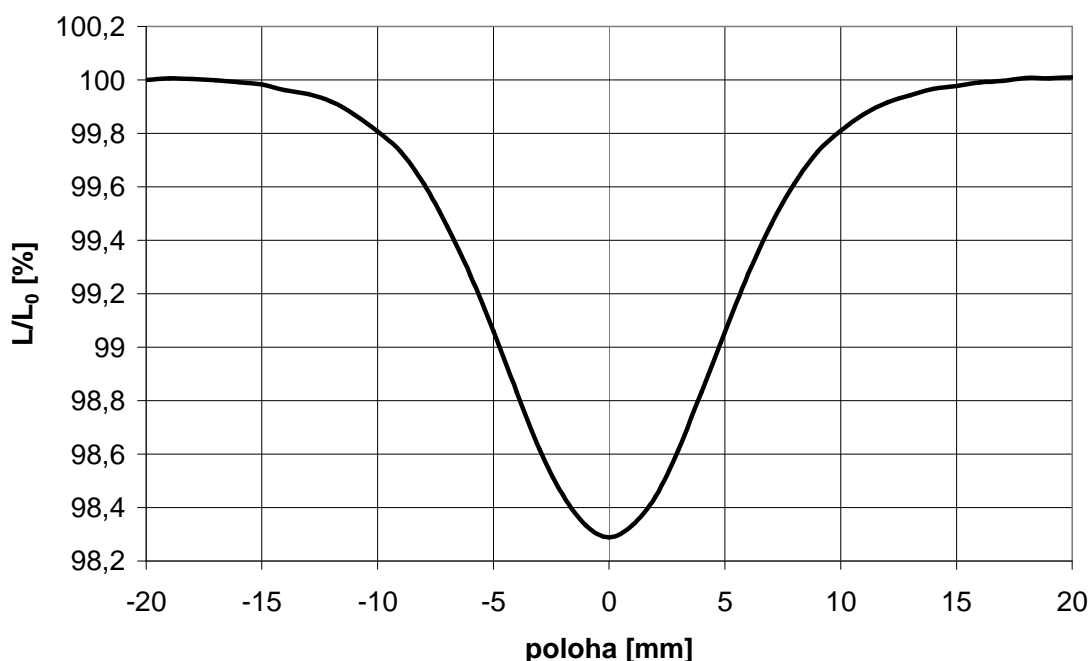
Obr. 5.5 Průběh změny indukčnosti pro cívku s poloměrem 16 mm pro různé délky vinutí



Obr. 5.6 – Průběh změny indukčnosti pro cívku s poloměrem 6 mm pro různé délky vinutí

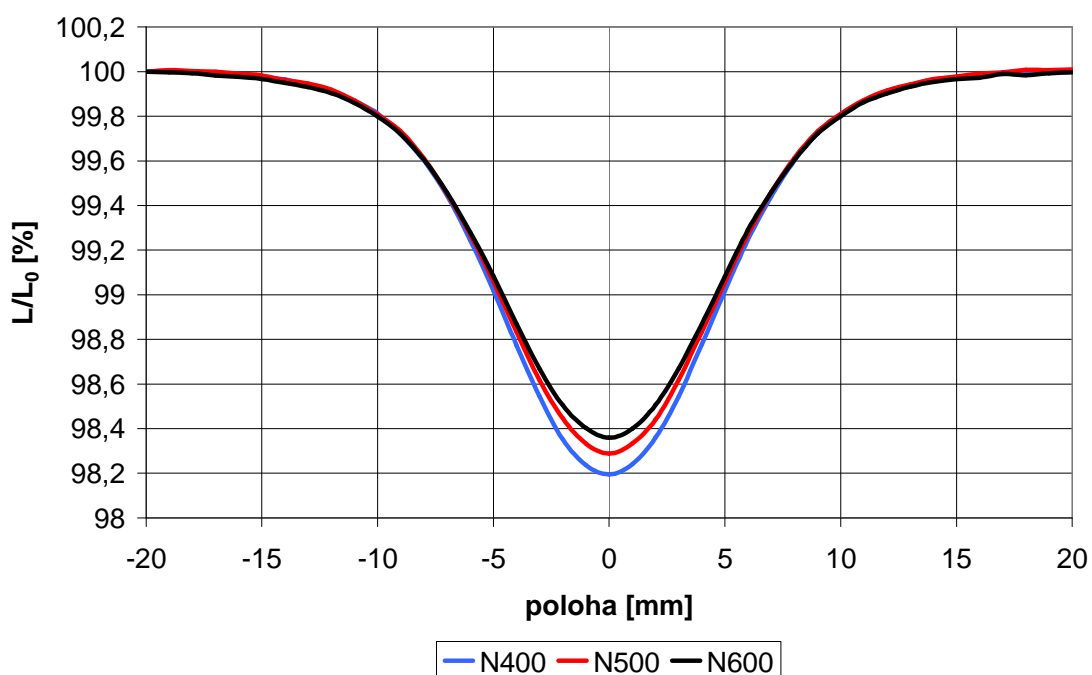
Z výše uvedených grafů je vidět, že se zmenšujícím se poloměrem snímací cívky roste změna indukčnosti. Dále dochází ke změně průběhu i v závislosti na délce vinutí. U cívky s poloměrem 16 mm je nejvyšší změna indukčnosti přibližně 1,2 % pro délku vinutí 15mm, kdežto u cívky s poloměrem 6 mm a délkou vinutí 10 mm už změna indukčnosti dosahuje více než 12 %.

Pro konstrukci hradla je tedy vhodné uvažovat co nejmenší poloměr snímací cívky. Z druhé strany s klesajícím poloměrem hradla se stává střelba skrz senzor obtížnější. Ideální šířka vinutí se se zmenšujícím se poloměrem též zmenšuje, avšak šířka 10 mm se jeví jako nejvhodnější. Výsledné rozměry hradla tedy musí být kompromisem mezi velikostí změny indukčnosti a obtížností prostřelení senzoru. Na základě těchto poznatků a dostupnosti konstrukčního materiálu byly využity pro stavbu senzoru kostřičky na cívky o vnějším poloměru 14 mm a šířkou vinutí 10 mm, vnitřní otvor pro pohyb měřeného objektu je 12 mm. Modelovaný průběh změny indukčnosti pro zvolené rozměry hradla je uveden na obr. 5.7.



Obr. 5.7 - Průběh změny indukčnosti pro zvolené rozměry hradla

Dále byl ověřen vliv počtu závitů na změnu indukčnosti cívky. Simulace byly provedeny pro 600, 500 a 400 závitů. Rozměry cívky odpovídají skutečným rozměrům hradla. Výsledné porovnání je zobrazeno na obr. 5.8, z něhož je vidět, že vliv počtu závitů na výsledný poměr indukčnosti není tak veliký jako vliv změny průměru cívky. Z důvodu získání vyšší hodnoty indukčnosti byl zvolen počet závitů 500, výsledná indukčnost takovéto cívky dle simulace je přibližně 3,2 mH.



Obr. 5.8 - Průběh změny indukčnosti pro různé počty závitů

5.1.2 Realizace snímací cívky

Pro realizaci cívky byly využity kostřičky na cívky z teplotně stálého plastu neovlivňující indukčnost cívky. Do kostřiček byly vyvrtány vnitřní kruhové otvory o průměru 12 mm pro umístění nosné trubičky. Vnější průměr kostřičky je 14 mm a šířka prostoru pro vinutí je 10 mm. Na obě kostřičky bylo navinuto 500 závitů.

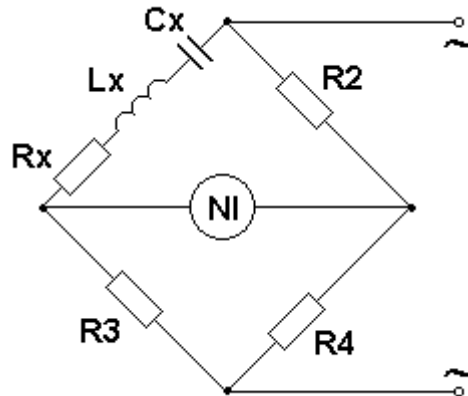


Obr. 5.9 - Realizované měřicí cívky

Po samotném navinutí cívek byla změřena hodnota jejich indukce na přístroji TESLA BM 595. Změřené hodnoty indukčnosti byly 3,74 mH a 3,607 mH. Aby byly cívky co nejvíce podobné bylo zapotřebí z cívky s vyšší hodnotou indukčnosti odmotat několik závitů a snížit tak indukčnost cívky na konečných 3,597 mH.

5.2 Zapojení hradla

Elektrické zapojení hradla bylo voleno s ohledem na co nejlepší využití malé změny indukčnosti cívky hradla. Z tohoto důvodu byla zvolena můstková metoda zapojení snímače. Z možných můstkových zapojení vhodných pro měření indukčnosti bylo zvoleno zapojení rezonančního můstku na obr. 5.10.



Obr. 5.10 - Rezonanční můstek

Rezonanční můstek je vhodný pro měření neznámého odporu, indukčnosti nebo kapacity, které je možné měřit s přesností až 0,01%. Můstek je frekvenčně závislý, proto je třeba znát napájecí frekvenci. Podmínky rovnováhy můstku jsou:

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} \quad [\Omega; \Omega, \Omega, \Omega] \quad (5.2)$$

$$L_x = \frac{1}{\omega^2 C_x} \quad [\text{H}; \text{rad.s}^{-1}, F] \quad (5.3)$$

5.2.1 Návrh rezonančního můstku

Pro návrh můstku je důležité znát parametry rezonanční větve. V tomto případě se jedná o sériové zapojení snímací cívky a kondenzátoru. Pro určení hodnoty kondenzátoru je potřebné znát hodnotu frekvence napájecího signálu. Frekvence napájecího signálu byla volena s ohledem na rychlost střely a velikost hradla. Jde především o to, aby při průletu měřeného předmětu byl ovlivněn dostatečný počet period napájecího signálu pro snadnější detekci měřeného předmětu. Z tohoto hlediska je vhodná co nejvyšší napájecí frekvence, avšak se vzrůstající frekvencí klesá hloubka vniku primárního magnetického pole do měřeného předmětu. S klesající hloubkou vniku vzniká méně vířivých proudů a následně nedochází k tak velké změně vlastní indukčnosti cívky hradla jako při nižší frekvenci. Z těchto důvodů byla zvolena napájecí frekvence 100 kHz.

Vzhledem k optimalizaci senzoru pro měření rychlosti střely vzduchové pušky, jejíž rychlost střely je přibližně do $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je zvolená frekvence 100 kHz dostačující z hlediska rychlosti střely i z hlediska dostatečné hloubky vniku. Vystřelený brok rychlostí $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ prolétne měřicí cívku širokou 10 mm za $50 \mu\text{s}$, to odpovídá době 5-ti period napájecího signálu, což je dostatečný počet period pro zachycení průletu projektilu.

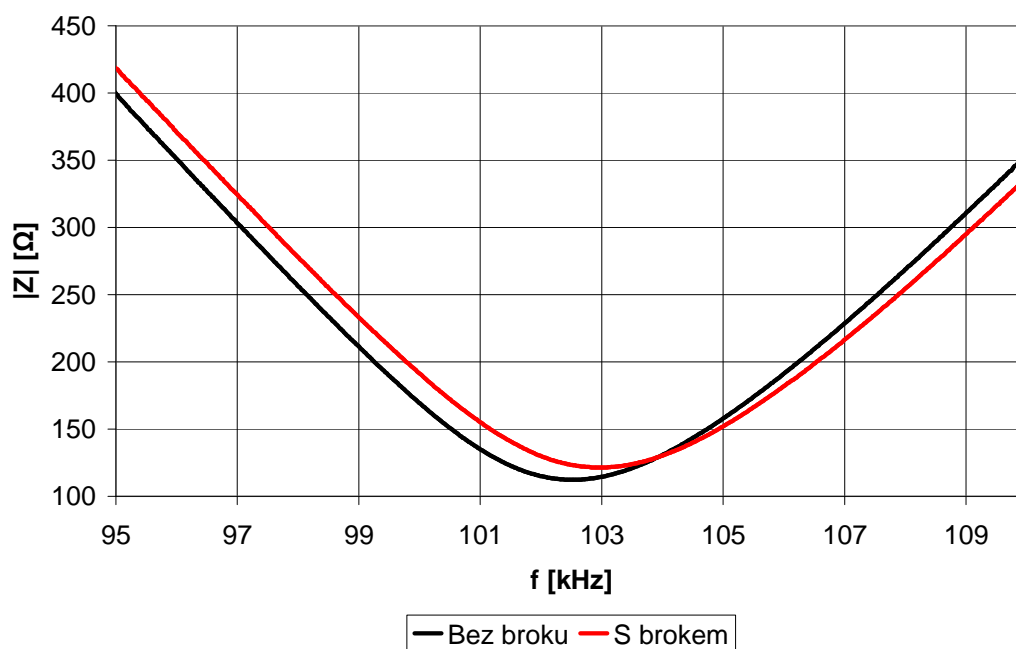
Ze známé napájecí frekvence a velikosti indukčnosti cívky snímače je určena hodnota potřebné velikosti kondenzátoru.

$$C = \frac{1}{L(2\pi f_0)^2} = \frac{1}{3,6 \cdot 10^{-3} (2\pi \cdot 10^5)^2} = 702 \text{ pF} \quad (5.4)$$

Ze vztahu 5.4 byla získána přibližná hodnota kondenzátoru 702 pF , nejbližší možnou dostupnou hodnotou kondenzátoru je 680 pF . S využitím tohoto kondenzátoru dostáváme následující hodnotu rezonanční frekvence f_0 pro jednotlivá hradla.

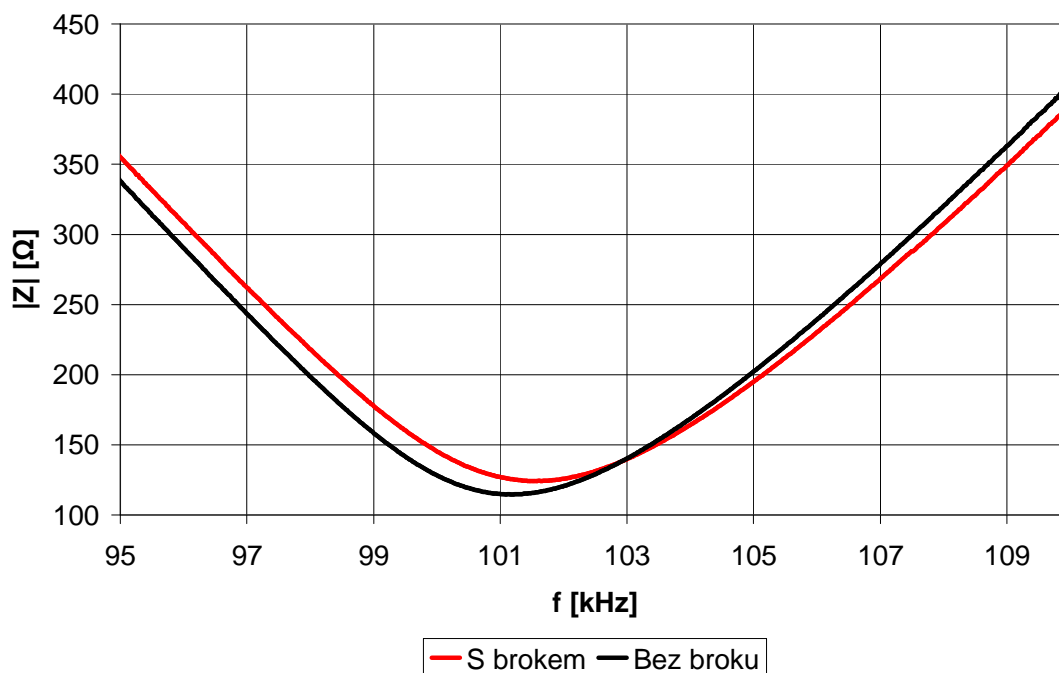
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 680 \cdot 10^{-12}}} = 101,7 \text{ kHz} \quad (5.5)$$

Teoretická hodnota rezonanční frekvence byla následně ověřena pomocí měření. Změřena byla frekvenční charakteristika sériového zapojení měřicí cívky a keramického kondenzátoru o hodnotě 680 pF . Pro každou měřicí cívku byla změřena frekvenční charakteristika bez vloženého a s vloženým olověným brokem do vnitřního otvoru nosné kostičky.



Obr. 5.11 - Frekvenční charakteristika RO s první cívku

Z grafu na obr. 5.11 je vidět posun rezonanční frekvence směrem k vyšším frekvencím při vložení broku do obvodu snímací cívky. Rezonanční frekvence obvodu bez vloženého broku je přibližně 102,5 kHz. Impedance rezonančního obvodu je na této frekvenci 112,4 Ω. Po vložení broku do obvodu cívky se impedance na frekvenci 102,5 kHz zvýší na hodnotu 123,3 Ω. Vložením broku do snímací cívky se tedy impedance rezonančního obvodu zvýší přibližně o 10 %.



Obr. 5.12 - Frekvenční charakteristika RO s druhou cívkou

Na obr. 5.12 je znázorněna frekvenční charakteristika rezonančního obvodu s druhou snímací cívkou. Je zde vidět odlišnost od charakteristiky znázorněné na obr. 5.11. Tato změna je dána nepřesností použitých kondenzátorů a rozdíly mezi jednotlivými cívkami. Rezonanční frekvence obvodu bez vloženého broku je 101,2 kHz a impedance obvodu při této frekvenci je 114,6 Ω, po vložení broku se impedance zvýšila na 125,6 Ω. Tato změna opět odpovídá přibližně 10 %.

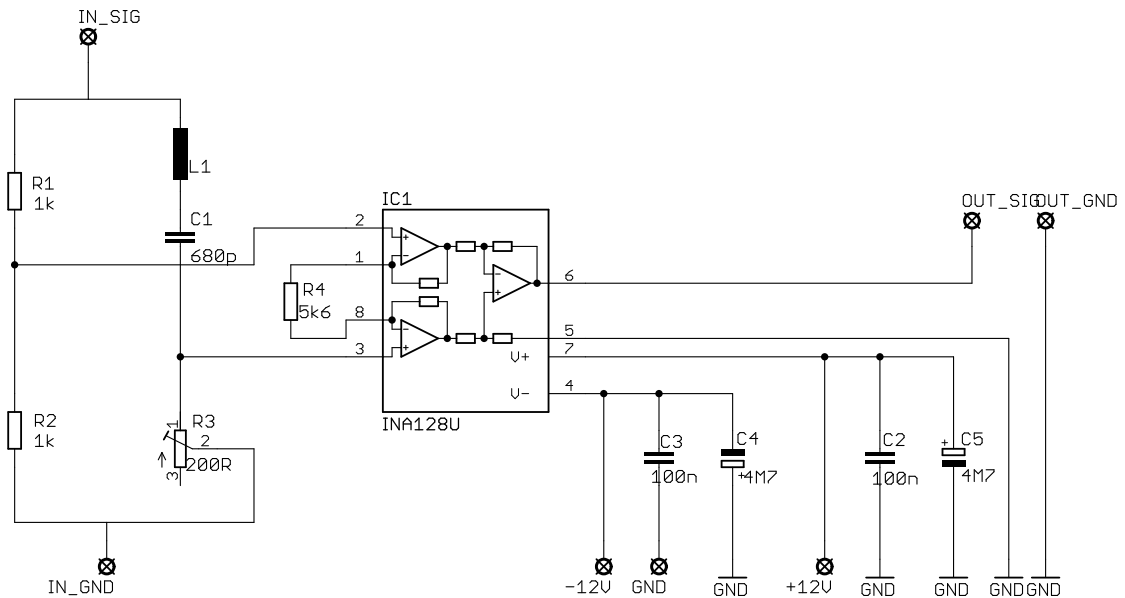
Pro samotný návrh můstku není důležitá hodnota rezistorů R_2 a R_4 , jelikož se v podmínce rovnováhy můstku (5.1) objevuje jejich poměr, stačí tedy zajistit jejich vhodný poměr. V tomto případě byl zvolen poměr 1:1, konkrétní hodnota odporu rezistorů R_2 a R_4 je 1 kΩ. Pro zvolený poměr odporů R_2/R_4 se podmínka rovnováhy 5.2 upraví do tvaru:

$$R_x = R_3 \quad [\Omega; \Omega] \quad (5.6)$$

Z podmínky 5.6 je vidět, že rezonanční můstek je vyvážený v případě, že hodnota odporu R_3 odpovídá hodnotě impedance rezonančního obvodu. Konkrétně 112,4 Ω pro první cívku a 114,6 Ω pro cívku druhou.

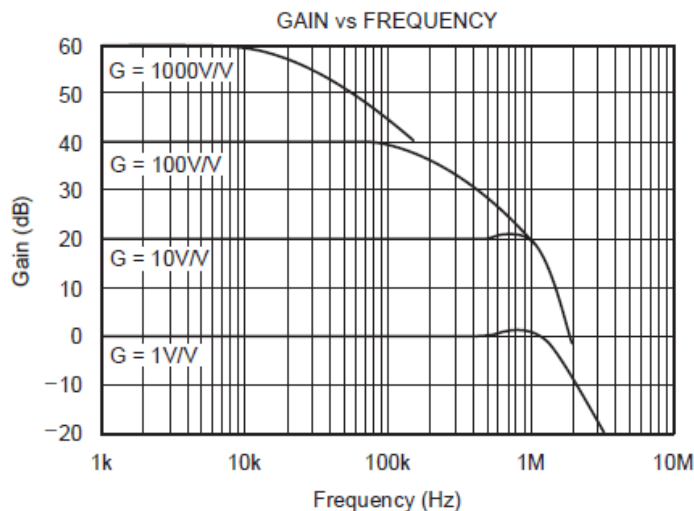
5.2.2 Realizace rezonančního můstku

Rezonanční můstek je zapojen dle schématu na obr. 5.13. V můstku jsou použity dva rezistory R_1 a R_2 o velikosti $1\text{ k}\Omega$, dále víceotáčkový odporový trimr R_3 o velikosti $200\ \Omega$, kterým bude můstek vyvažován. Rezonanční obvod dle návrhu v kapitole 5.2.1 je složen ze snímací cívky L_1 a kondenzátoru C_1 o velikosti 680 pF . Napětí na diagonále je vyhodnocováno pomocí přístrojového zesilovače INA128.



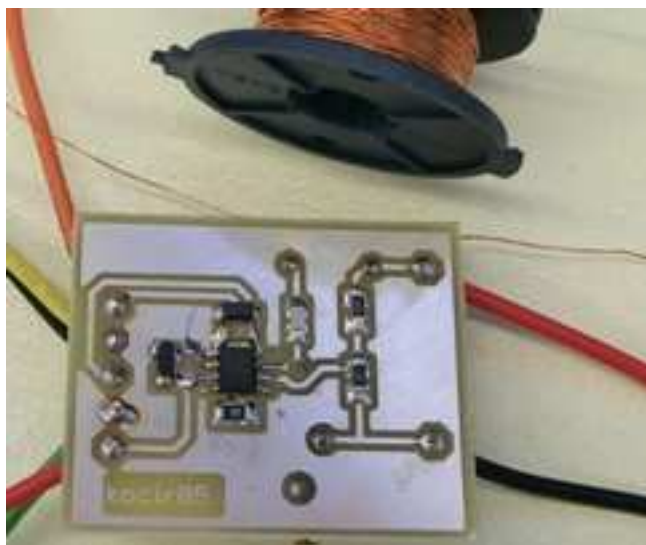
Obr. 5.13 - Zapojení rezonančního můstku

Přístrojový zesilovač INA128 byl zvolen díky své šířce pásma $1,3\text{ MHz}$. Zesilovač tedy poskytuje dostatečné zesílení signálu o frekvenci 100 kHz , na které je senzor provozován, v tomto případě $10\times$. Závislost velikosti zesílení na frekvenci je zobrazena na obr. 5.14. Další výhodnou vlastností přístrojového zesilovače je minimální zatížení obvodu můstku, jelikož vstupní proud zesilovače je minimální.



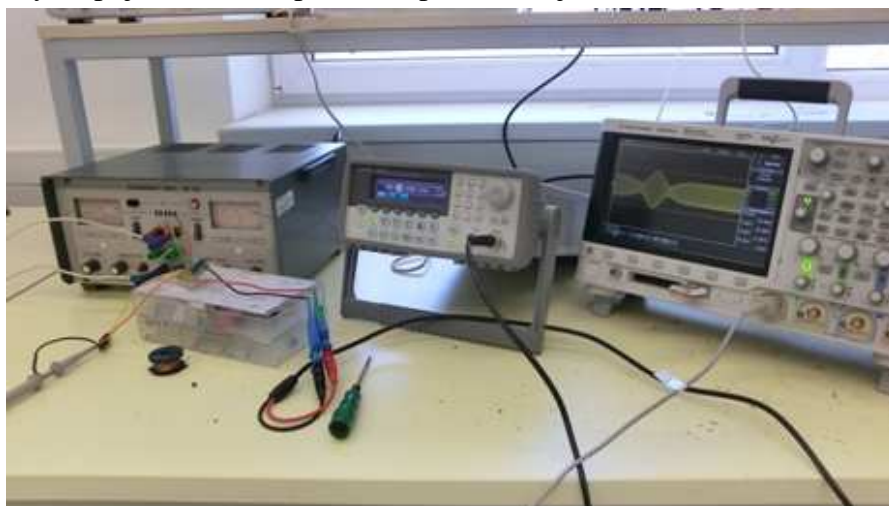
Obr. 5.14 - Frekvenční charakteristika OZ INA128 [11]

K realizaci můstku byly použity bezvývodové součástky (SMD) pro potlačení parazitních jevů, které se u vývodových součástek vyskytují a pro zmenšení velikosti výsledného plošného spoje. Osazená deska DPS je vyobrazena na obr. 5.15.



Obr. 5.15 - Realizovaná DPS

Po oživení hradla bylo nutné najít rezonanční frekvenci můstku a nastavit hodnotu odporu trimru R_3 , aby byl můstek vyvážený, resp. napětí na výstupu přípravku bylo co nejmenší. Pro potřeby vyvážení můstku bylo zvoleno napájecí napětí přístrojového zesilovače ± 5 V, samotný můstek byl buzen z generátoru sinusovým signálem s amplitudou 0,5 V (1 V špička-špička) o výchozí frekvenci 100 kHz. Na výstup přípravku byl zapojen osciloskop. Měřící pracoviště je znázorněno na obr. 5.16.



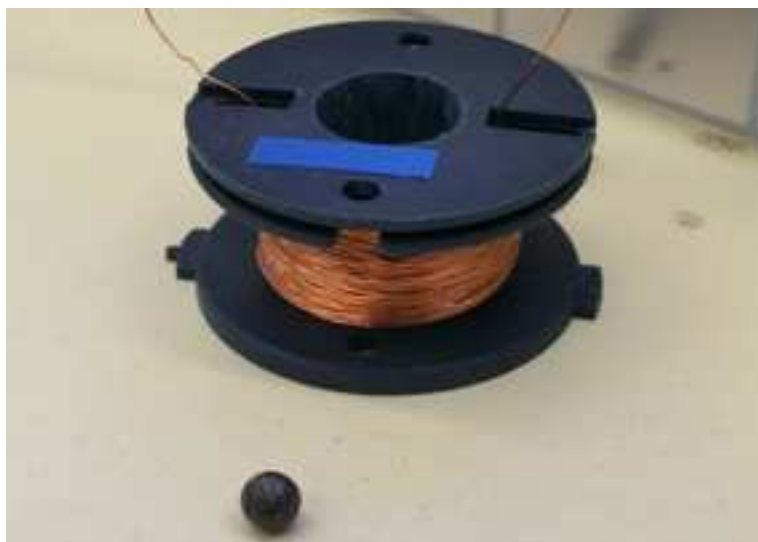
Obr. 5.16 - Měřící pracoviště

Výsledná rezonanční frekvence přípravku byla nalezena pomocí postupného přeladování generátoru a úpravami odporu trimru. Při nejnižším výstupním napětí přípravku sledovaném na připojeném osciloskopu, byla frekvence budícího signálu 99,6 kHz. Tato hodnota se lehce liší od vypočtené a změřené hodnoty v kap. 5.2.1, to je dáno

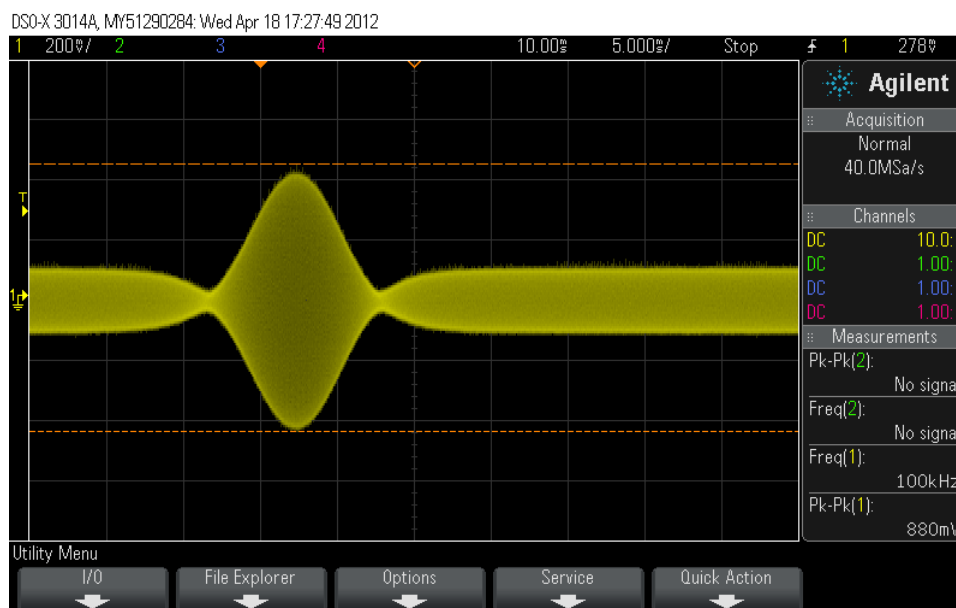
použitím jiného kondenzátoru než v tomto bodě a přidáním dalších parazitních jevů daných konstrukcí DPS.

5.3 Ověření funkčnosti hradla

Samotná funkčnost senzoru byla vyzkoušena pomocí prohození olověného broku a kovové matičky (obr. 5.17) snímacím otvorem měřicí cívky.

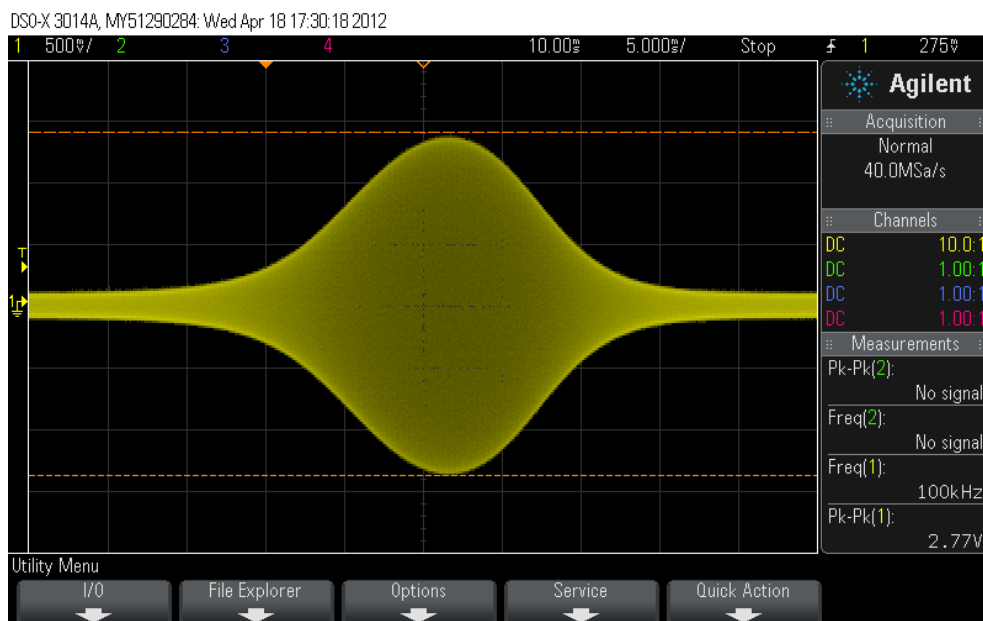


Obr. 5.17 - Zkoumané předměty



Obr. 5.18 - Výstup čidla při prohození broku

Na obr. 5.18 je znázorněn průběh výstupního napětí přípravku po prohozu broku cívkou. Klidová hodnota amplitudy napětí byla přibližně 150 mV, při prohozu broku následně vytvořená špička napětí dosáhla maximální hodnoty 440 mV. Maximální změna napětí tedy dosáhla téměř trojnásobku klidové hodnoty.



Obr. 5.19 - Výstup při prohození matičky

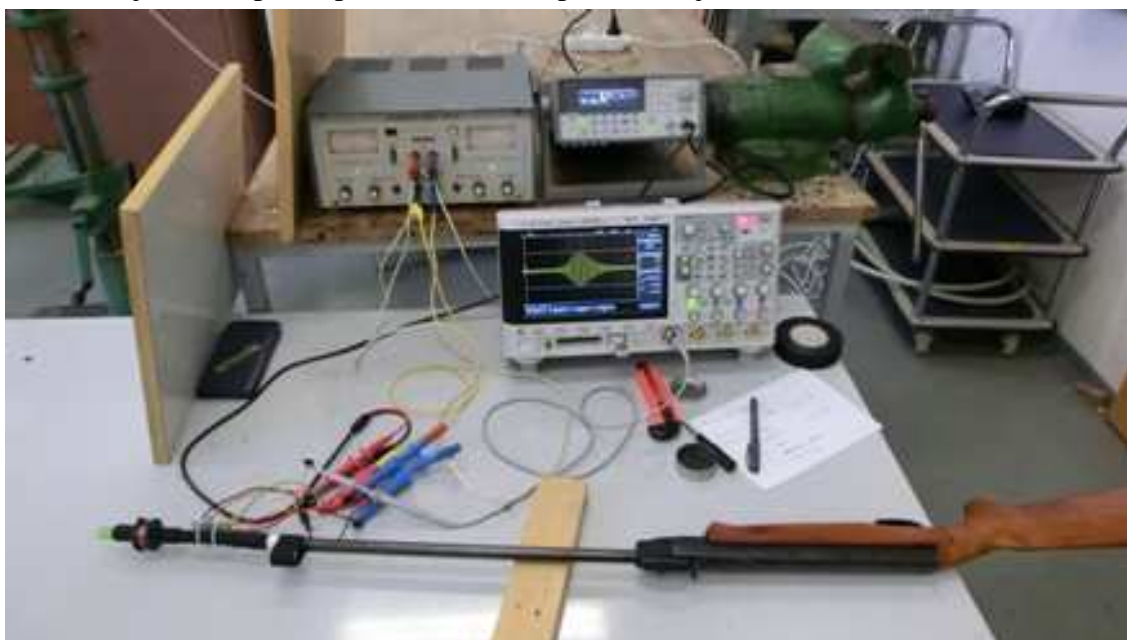
Průběh výstupního napětí při prohozu kovové matičky cívkou je znázorněn na obr. 5.19. V tomto případě je maximální hodnota amplitudy výstupního signálu přípravku téměř 1,4 V. Tato hodnota je mnohem vyšší než v případě olověného broku. Tato změna je dána magnetickými vlastnostmi těchto dvou materiálů, kdy permeabilita olova je mnohem bližší hodnotě permeability vzduchu než permeabilita železa. Měřicí cívka tedy na přítomnost železa reaguje mnohem více než na olovo.

Po ověření funkčnosti hradla na prohoz olověného broku resp. kovové matičky byla ověřena funkčnost i na průstřel broku ze vzduchové pušky skrz snímací cívku. Pro potřeby měření byla vytvořena nosná konstrukce, která umožňovala uchycení přípravku k hlavni pušky (Obr. 5.20). Konstrukce se skládá z plastové trubičky o vnějším průměru 12 mm, kterou je brok prostřelován. Na tuto trubičku je nasazena snímací cívka a uchycena DPS s měřicími obvody, výsledná vzdálenost mezi ústím hlavně a snímací cívkou je 14 cm, což je vzdálenost dostatečně velká, aby nedocházelo k nežádoucímu ovlivnění měření hlavní pušky. Tato nosná trubička je na vzdálenějším konci uchycena do trubičky o průměru 16 mm, která je na jedné straně rozpůlena, čímž je umožněno nasazení přípravku na hlavě pušky. Přípravek je dále fixován černou textilní páskou, aby nedošlo k odpadnutí snímače při střelbě.

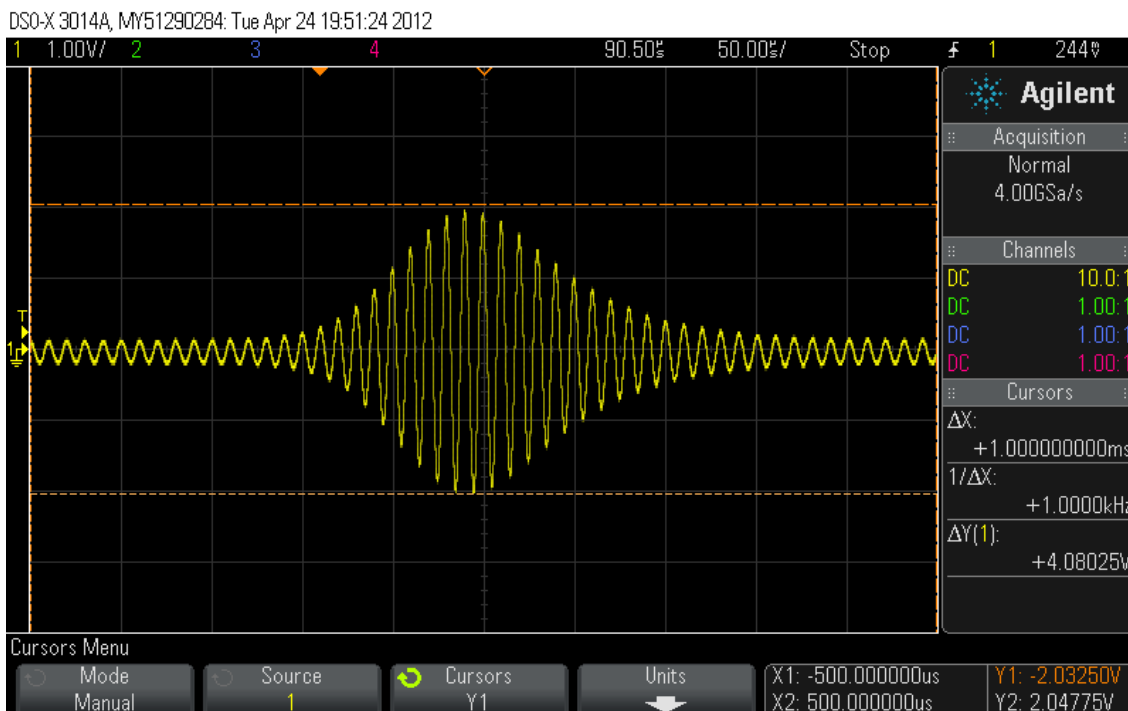


Obr. 5.20 - Uchycení přípravku k hlavní vzduchové pušce

Jelikož funkčnost zapojení byla již otestována pomocí prohozu, bylo pro toto měření zvoleno napájecí napětí přístrojového zesilovače $\pm 10\text{ V}$, maximální možné je $\pm 18\text{ V}$. Amplituda budícího napětí byla také zvýšena na $2,5\text{ V}$ (5 V špička-špička), frekvence zůstala stejná. Kompletní pohled na měřicí pracoviště je na obr. 5.21.



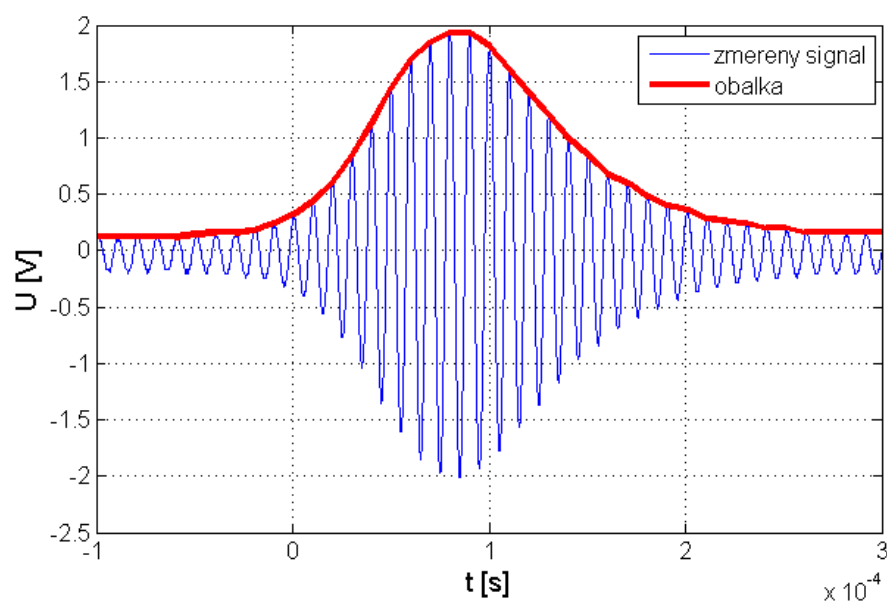
Obr. 5.21 - Měřicí pracoviště



Obr. 5.22 - Výstup senzoru po průstřelení olověným brokem

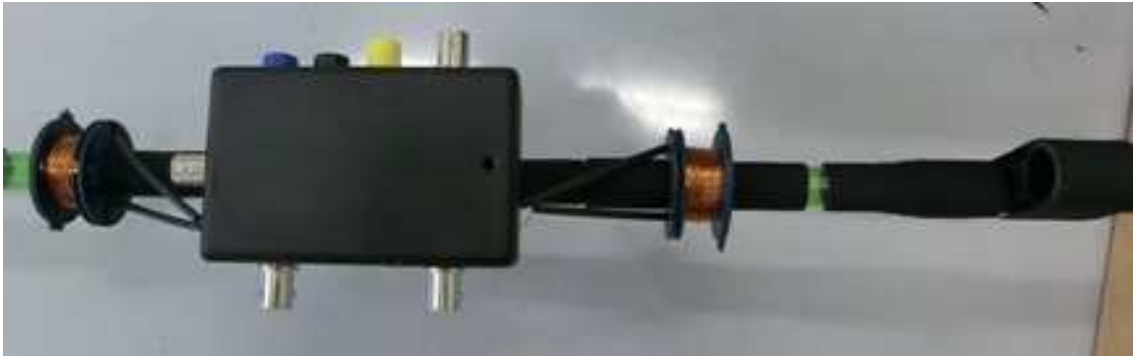
Získaný výstupní signál po průstřelu senzoru olověným brokem ze vzduchové pušky je na obr. 5.22. Klidová hodnota amplitudy je 120 mV, při průstřelu je maximální amplituda signálu 1,93 V. Maximální hodnota amplitudy je tedy přibližně 16x větší než je klidová.

Pro získání obálky výstupního signálu byl použit skript v programu MATLAB, který změřený signál rozdělí na jednotlivé periody a na nich hledá maximální hodnotu. Z nalezených pozic a hodnot maxim je následně rekonstruován graf obálky signálu. Získaný průběh obálky signálu je zobrazen na obr. 5.23.



Obr. 5.23 - Získaný průběh obálky změřeného signálu

5.4 Realizace snímače



Obr. 5.24 - Realizace snímače

Po ověření funkčnosti samotného hradla a jeho zapojení bylo přistoupeno ke konečné realizaci senzoru rychlosti. Konstrukce vychází z poznatků uvedených v kapitole 2. Senzor se skládá ze dvou cívek a měřicí elektroniky. Kvůli úspoře místa je elektronika snímače realizována na jedné DPS pro obě hradla. Napájení je ze symetrického zdroje napětí, maximální napájecí napětí je omezeno použitým přístrojovým zesilovačem INA128 na ± 18 V. Buzení je realizováno dvěma generátory sinusového signálu, aby bylo možné oba měřicí můstky nastavit do rezonance. Pro vyhodnocení signálů je využit dvoukanálový osciloskop.

Středů měřicích cívek jsou od sebe vzdáleny 20 cm, což je zároveň i velikost báze sestaveného senzoru. Samotná elektronika je umístěna do plastové krabičky o rozměrech 24x55x89 mm (výška, šířka, hloubka), která je pomocí dvou samolepících kabelových příchytěk připevněna k nosné trubičce o průměru 12 mm.

6 OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ SENZORU

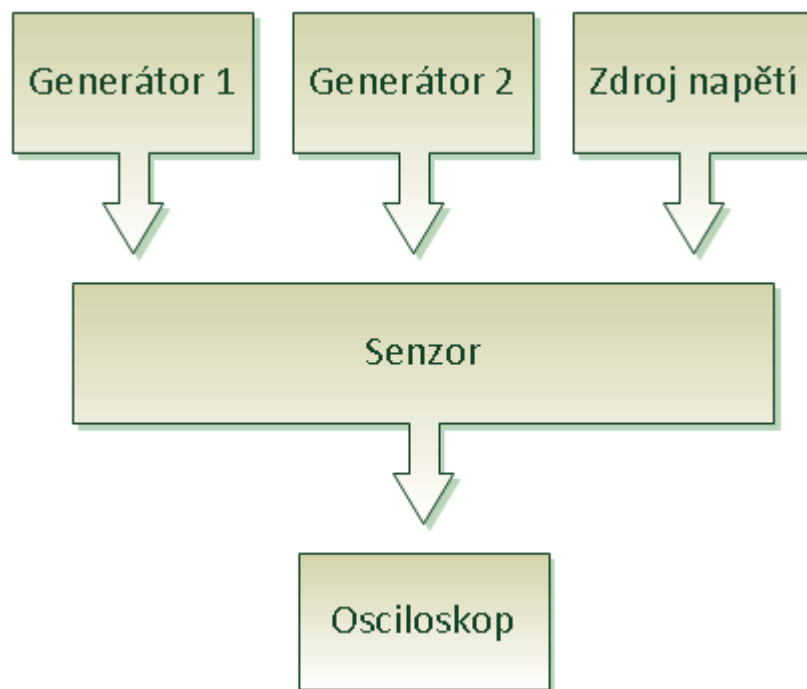
Ověření vlastností sestaveného senzoru rychlosti proběhlo ve dvou krocích. Nejdříve byla ověřena samotná funkčnost přípravku a po jejím ověření došlo k porovnání s profesionálním optickým hradlem firmy PROTOTYPA a.s.

6.1 Ověření funkčnosti senzoru

Po sestavení celého přípravku byla vyzkoušena schopnost senzoru změřit rychlost broku vystřeleného ze vzduchové pušky. Pracoviště je vyobrazeno na obr. 6.1, blokové schéma je znázorněno na obr. 6.2.



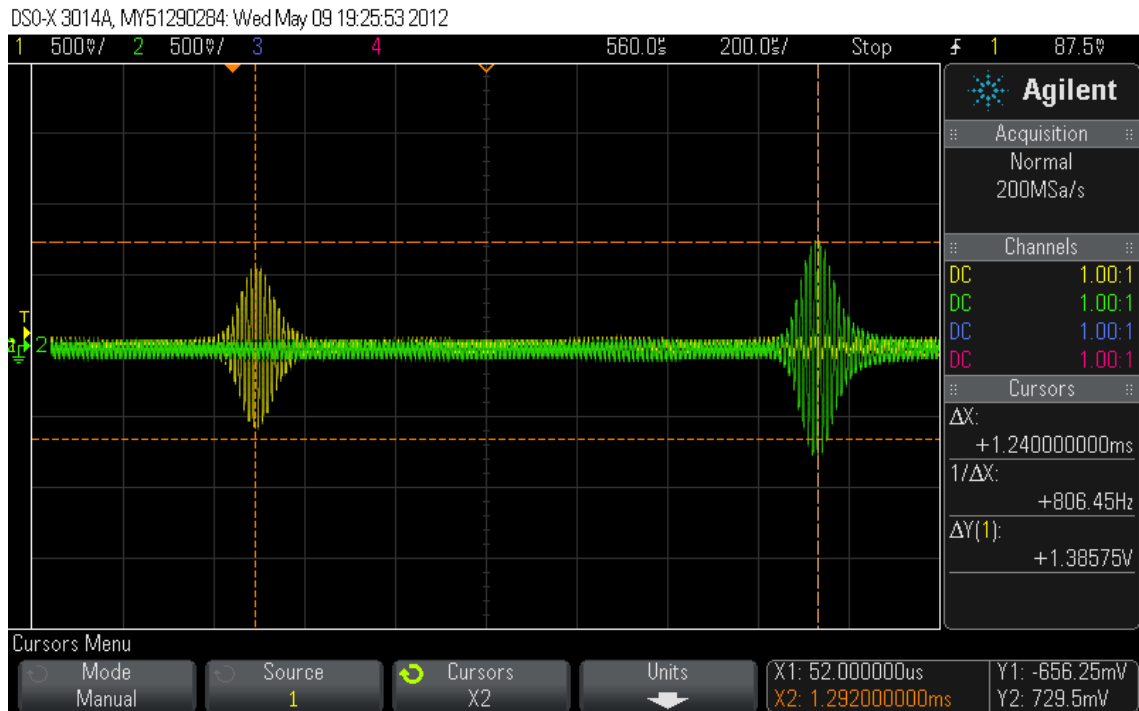
Obr. 6.1 - Měřící pracoviště



Obr. 6.2 - Blokové schéma měřícího pracoviště

Pracoviště bylo sestaveno ze dvou funkčních generátorů Agilent 33220A, napájecího zdroje Agilent E3631A a osciloskopu Agilent DSO-X 3014A. Napájení operačních zesilovačů bylo zvoleno ± 10 V, amplituda budících signálu byla 1 V. Jednotlivé cívky díky svým rozdílným vlastnostem byly buzeny signálem o různých frekvencích, konkrétně 95,6 kHz a 98,1 kHz.

6.1.1 Střela č.1



Obr. 6.3 - Průběh výstupních signálů pro první střelu

Na obr. 6.3 je vyobrazen průběh výstupních signálů senzoru po průstřelu olověným brokem. V průbězích jsou patrné dvě špičky, které odpovídají průchodu broku hradlem. Pomocí kurzorů osciloskopu bylo mezi jednotlivým špičkami odečteno časové zpoždění 1,24 ms. Ze známé délky báze 20 cm a tohoto časového zpoždění je možné pomocí rovnice 2.1 určit rychlost střely.

$$v = \frac{l}{t} = \frac{0,2}{1,24 \cdot 10^{-3}} = 161,3 \text{ m.s}^{-1} \quad (6.1)$$

Výsledná rychlost $161,3 \text{ m.s}^{-1}$ odpovídá předpokládané rychlosti střely. Tento výsledek je ovšem zatížen určitou chybou, která vznikla při měření báze senzoru. Jestliže budeme předpokládat chybu měření báze 1 mm, pak výsledná rychlost je zatížena absolutní chybou $0,8 \text{ m.s}^{-1}$ dle 6.2, což představuje chybu menší než 1 %.

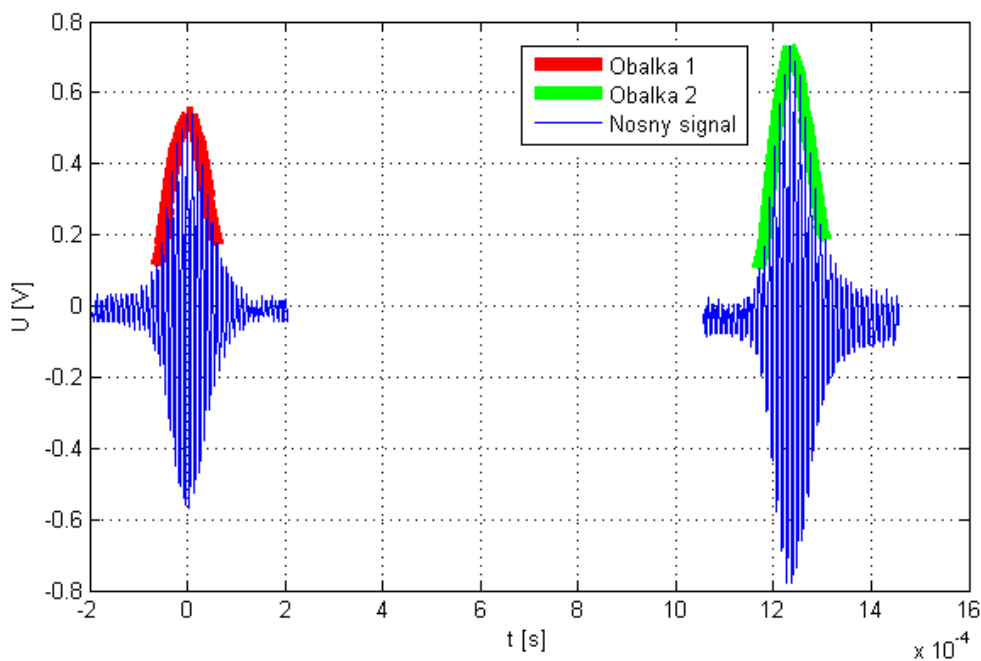
$$\Delta v = \frac{l}{t} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{1,24 \cdot 10^{-3}} = 0,8 \text{ m.s}^{-1} \quad (6.2)$$

Dalším možným zdrojem chyb je odečet časového zpoždění mezi špičkami resp. přesné určení momentu, kde ke špičce dochází. Když budeme předpokládat chybu odečtení časového zpoždění $20 \mu\text{s}$ (polovina pomocného časového měřítka osciloskopu) je velikost absolutní chyby $2,6 \text{ m.s}^{-1}$ dle 6.4, což představuje chybu přibližně 1,5%.

$$v_0 = \frac{l}{t} = \frac{0,2}{1,26 \cdot 10^{-5}} = 158,7 \text{ m.s}^{-1} \quad (6.3)$$

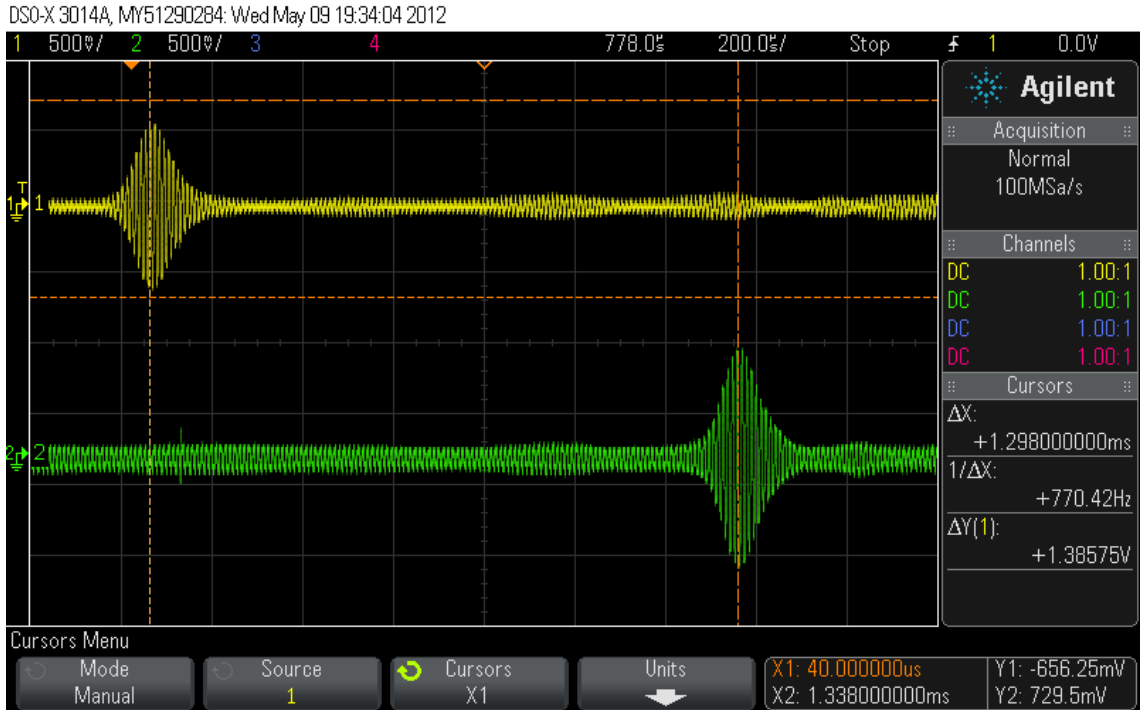
$$\Delta v = v - v_0 = 161,3 - 158,7 = 2,6 \text{ m.s}^{-1} \quad (6.4)$$

Pro možnost lepší orientace byla ze signálu získána obálka stejně jako v kap. 5.3. Tentokrát však byla získána pouze pro hodnoty napětí vyšší než 0,15 V kvůli zašumění signálu, které nedovolovalo použití jednoduchého skriptu ze zmíněné kapitoly.



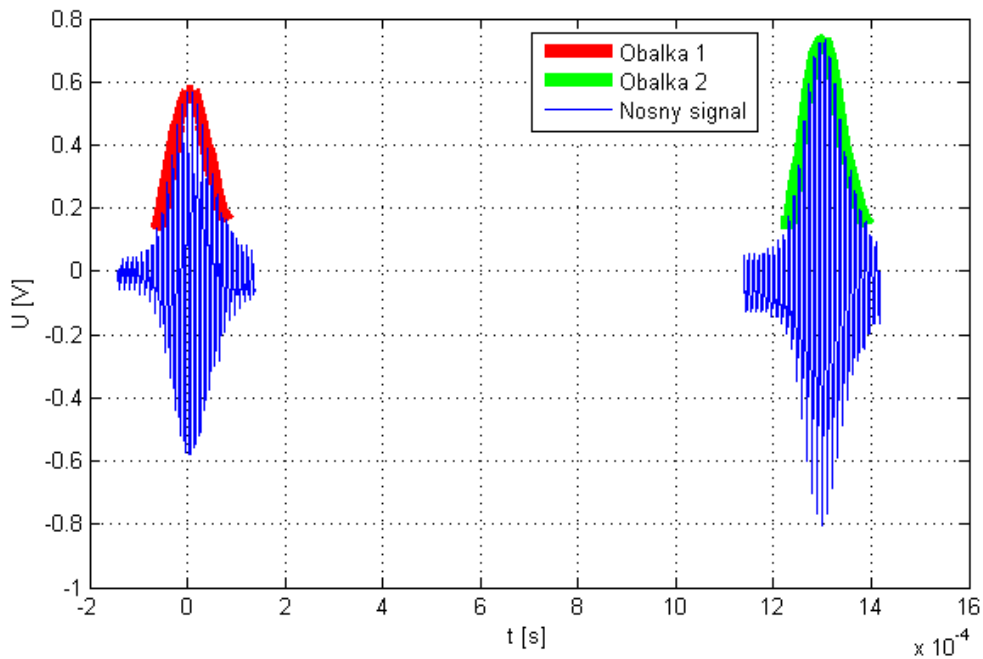
Obr. 6.4 - Obálky napět'ových špiček pro první střelu

6.1.2 Střela č.2



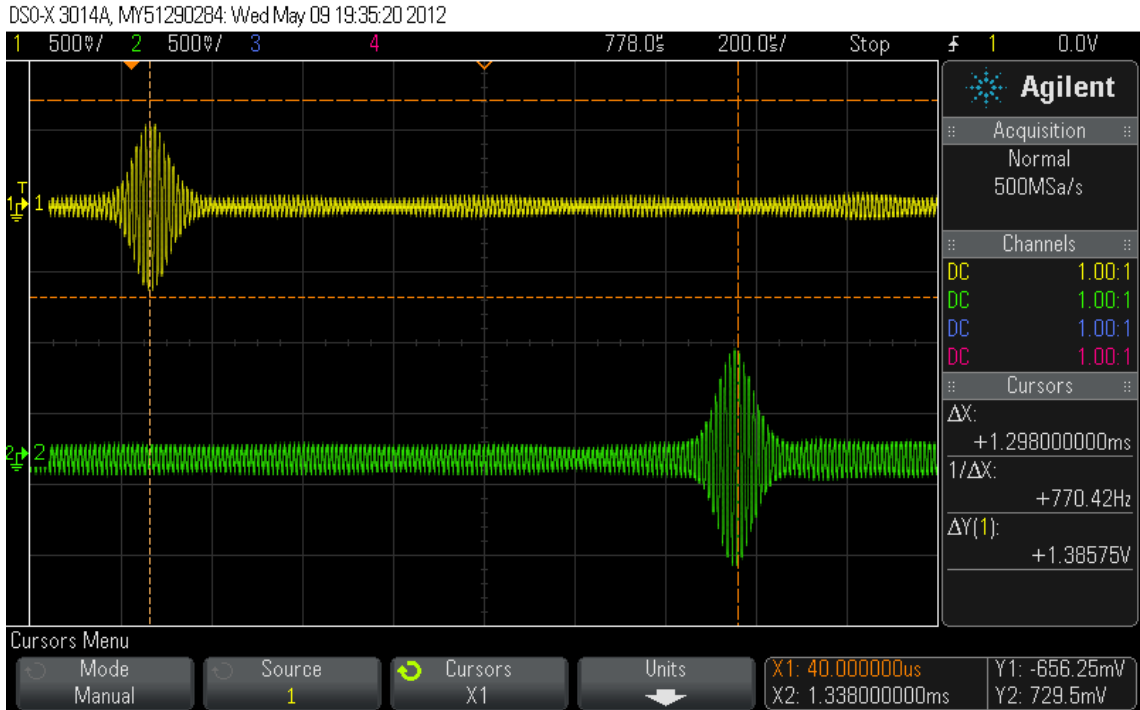
Obr. 6.5 –Průběh výstupních signálů pro druhou střelu

Na obr. 6.5 jsou znázorněny průběhy výstupních signálů pro druhou střelu. V tomto případě byl časový posun mezi napět'ovými špičkami 1,298 ms. To odpovídá rychlosti střely $154,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ což opět odpovídá očekávané rychlosti broku. Obálky napět'ových špiček jsou znázorněny na obr. 6.6.



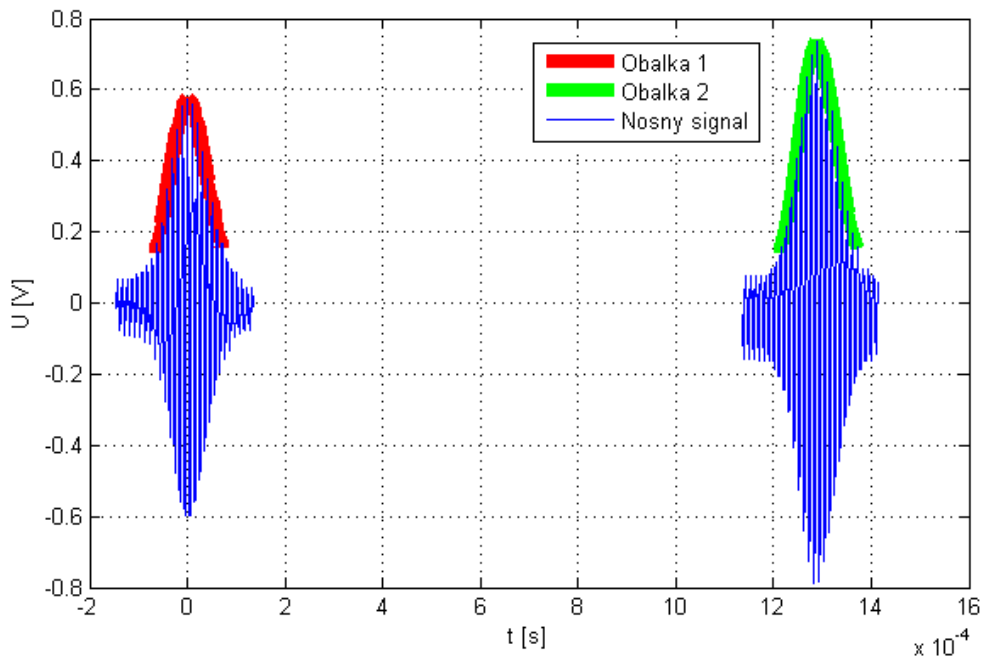
Obr. 6.6 – Obálky napět'ových špiček pro druhou střelu

6.1.3 Střela č.3



Obr. 6.7 - Průběh výstupních signálů pro druhou střelu

Výstupní signály po třetí střele jsou znázorněny na obr. 6.7. Změřená rychlost je totožná s rychlostí střely č.2 tedy $154,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

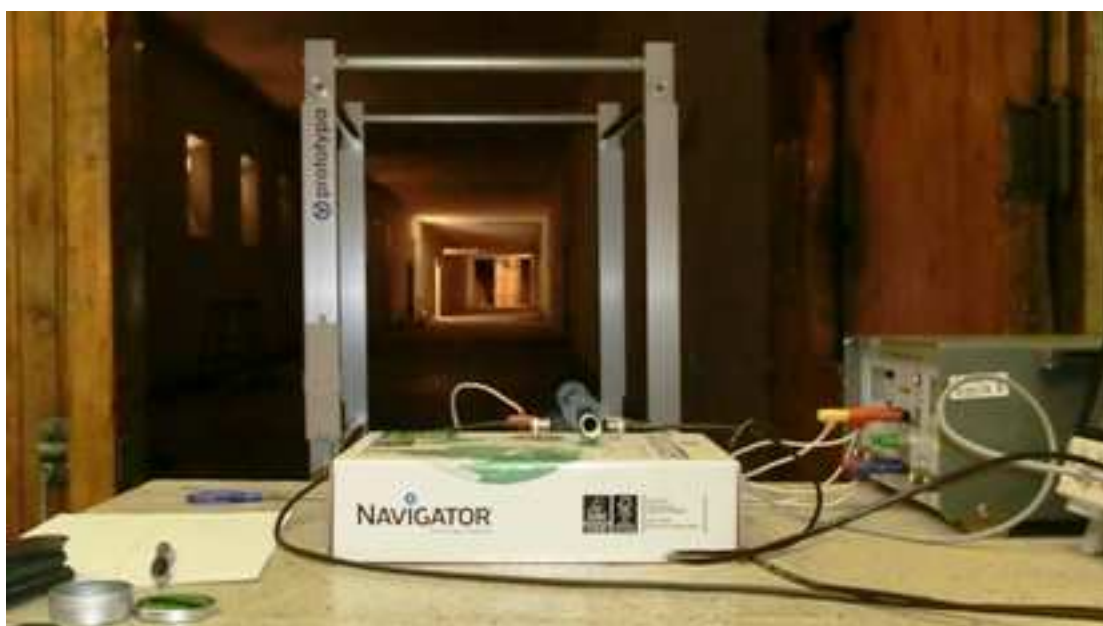


Obr. 6.8 - Obálky napěťových špiček pro třetí střelu

6.2 Porovnání senzoru s profesionálním řešením

Pro porovnání vytvořeného senzoru s profesionálním řešením bylo využito diodové hradlo LS-06 double firmy Prototypa. Jedná se o optické hradlo jehož zdrojem světla jsou světelné diody. Označení double znamená, že konstrukce hradla nese dva páry na sobě nezávislých světelných bran, tudíž umožňuje během jednoho výstřelu provést dvě měření rychlosti na přibližně stejném měřeném úseku. Délka báze použitého systému je 1 m.

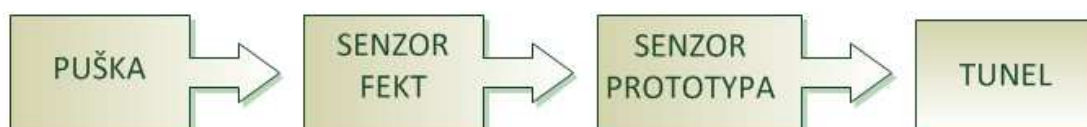
Při samotném měření bylo provedeno 2-krát pět výstřelů ze vzduchové pušky přes sestavené a komerční hradlo. V prvním případě byla vzdálenost mezi senzory 2m, ve druhém 20 cm.



Obr. 6.9 - Pohled na střelecký tunel a použitá hradla

6.2.1 Umístění hradel 2 m od sebe

V prvním případě byly měřicí hradla od sebe vzdálená 2 m, měřicí řetězec byl sestaven dle obr. 6.10.

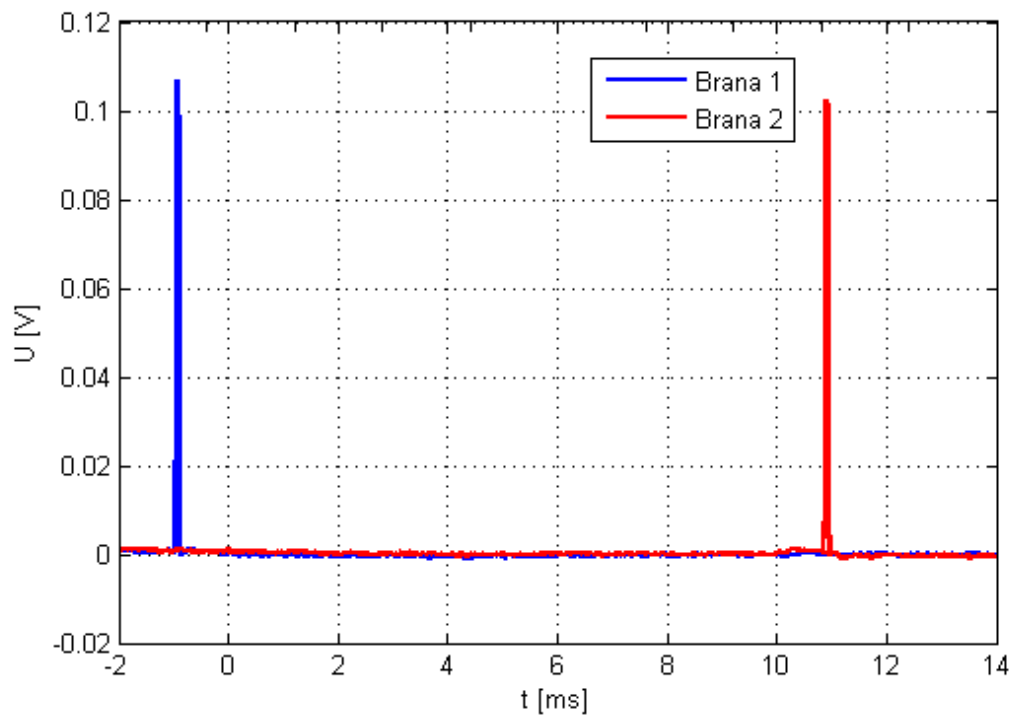


Obr. 6.10 - Měřicí řetězec

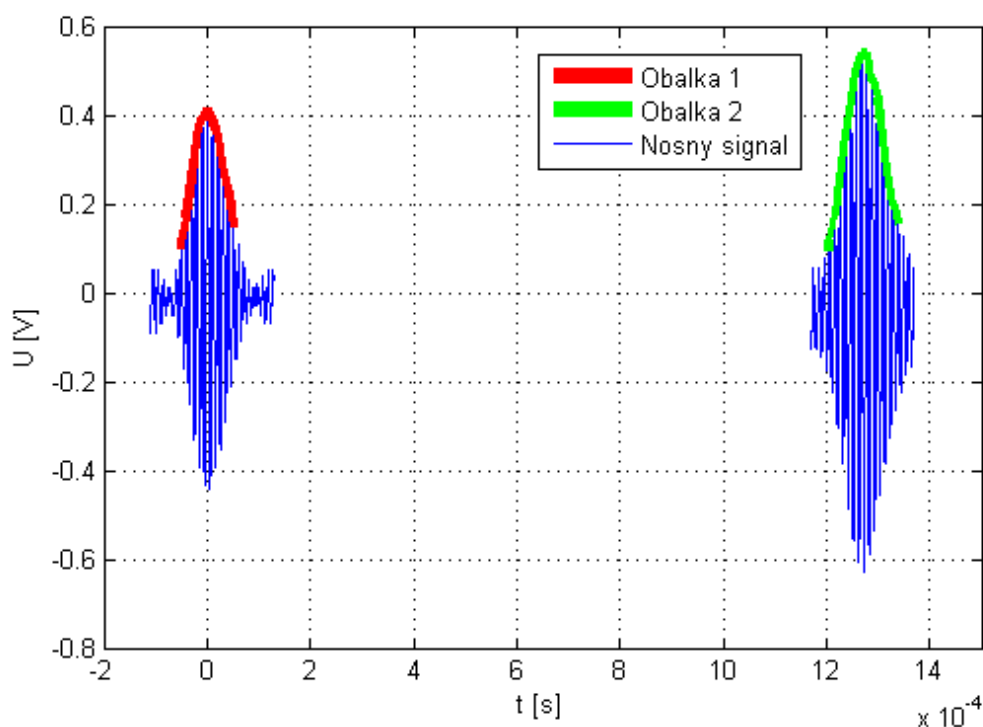
Měření	Senzor FEKT [m.s ⁻¹]	Senzor Prototypa [m.s ⁻¹]	Δ [m.s ⁻¹]	δ [%]
1	163,4	158,6	4,8	3,0
2	156,3	152	4,3	2,8
3	161,6	156,8	4,8	3,1
4	158,2	153,3	4,9	3,2
5	156,2	151	5,2	3,4

Tabulka 6-1 – Změřené rychlosti

V tabulce 6-1 jsou uvedeny změřené rychlosti střely pomocí sestaveného senzoru (Senzor FEKT) a komerčního řešení (Senzor prototypa). Změřená chyba se pohybuje od 2,8 do 3,4 %. Tato je dána několika příčinami a to chybou měření báze, nepřesným odečtením času mezi vrcholy a zároveň určením vrcholu a poklesem rychlosti broku na dráze letu. Změřené výstupní signály pro druhé měření jsou na obr. 6.11 a 6.12.



Obr. 6.11 - Výstupní signál z optického hradla



Obr. 6.12 - Signál z indukčnostního hradla

6.2.2 Umístění hradel 20 cm od sebe

Pro potlačení vlivu poklesu rychlosti broku na dráze letu bylo pro druhé měření optické hradlo přisunuto blíže k indukčnostnímu hradlu. Nová vzdálenost tedy umožňuje přesnější porovnání, avšak stále se uplatňuje velikost báze optického hradla, kdy jím změřená rychlost odpovídá rychlosti broku uprostřed hradla tj. 50 cm od počátku hradla.

Měření	Senzor FEKT	Senzor Prototypa	Δ	δ
	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[%]
1	131,6	128,7	2,9	2,3
2	159,5	156,4	3,1	2,0
3	160,8	157,9	2,9	1,8
4	159,7	157	2,7	1,7
5	162,1	159,5	2,6	1,6

Tabulka 6-2 – Změřené rychlosti

Z tabulky 6-2 je zřejmé, že se zmenšením vzdálenosti mezi jednotlivými senzory došlo ke snížení chyby měření, kdy nová maximální chyba činí 2,3 %. To je o přibližně 1 % lepší než v případě prvního měření. Pro úplné vyloučení chyby vzniklé změnou rychlosti broku během jeho letu by bylo třeba hodnoty změřené rychlosti upravit dle hodnot změřených pomocí Dopplerova radaru, který dokáže měřit rychlost střely po celé trajektorii letu.

7 ZÁVĚR

V práci jsou popsány stávající metody měření rychlosti rychle se pohybujících předmětů. Tyto metody jsou většinou založeny na elektromagnetickém nebo optickém principu. Elektromagnetické metody byly používány dříve než metody optické, které jsou v dnešní praxi používanější. Optické metody však mají svá omezení a neumožňují měření v blízkosti hlavně. Z tohoto důvodu se pozornost soustředí zpět na elektromagnetické metody měření rychlosti, na které se soustředí i praktická část práce.

V praktické části bakalářské práce byl vytvořen funkční prototyp senzoru na inkčnostním principu. Pro návrh senzoru byl využit princip senzoru polohy s potlačeným magnetickým polem. Teoretické předpoklady byly nejdříve ověřeny pomocí simulací v programu FEMM, které prokázaly vazbu mezi indukčností cívky a polohou kovového broku. Na základě těchto simulací byly navinuty dvě snímací cívky, které umožňují zachycení průletu kovového předmětu.

Pro co možná nejlepší využití malé změny indukčnosti měřicí cívky bylo využito zapojení rezonančního můstku, kdy i malá změna indukčnosti vyvolá velkou změnu výstupního napětí.

Výsledný senzor je složen ze dvou měřících cívek a elektroniky. Pro měření rychlosti je však potřeba použití dalších přístrojů, konkrétně symetrického napěťového zdroje, dvou generátorů a osciloskopu.

Za pomoci vytvořeného prototypu bylo na závěr práce provedeno zkušební měření v prostorách zkušební střelnice firmy PROTOTYPA a.s., kde došlo k porovnání sestavného přípravku s komerčním řešením.

Pro další vývoj by bylo vhodné elektroniku snímače doplnit o vlastní zdroj střídavého signálu, čímž by odpadla potřeba dvou přístrojů, avšak za cenu určitých kompromisů v možnostech nastavení pracovní frekvence, a usměrnění výstupního signálu, které by umožňovalo komfortnější vyhodnocení. Dále je potřeba vytvořit celý přípravek z robustnějších materiálů, aby nedocházelo k prohnutí nosné trubičky pod tíhou samotného senzoru a připojených kabelů.

Literatura

- [1] KOČÍ, R. *Speciální senzory pro snímání rychlých jednorázových dějů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky, 2012. 44s.
- [2] BOQUAN, Li, Wang XIAOFEI, Pan HAIBIN a Luo KAIYU. Study on Error Analysis of Measuring Projectile's Speed Using Induction-Type Coil Target. In: *Lectrical and Control Engineering (ICECE)*, 2010 International Conference on [online]. Wuhan, 2010 [cit. 4.11.2011]. ISBN 978-1-4244-6880-5. DOI: 10.1109/iCECE.2010.513. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=5630097>
- [3] JIYAN, Yu, Wang XIAOMING a Li YONGXIN. Velocity and Position Measurement for Projectile Using Double Optical Detectors and Reflectors. In: *Photonics and Optoelectronics*, 2009. SOPO 2009. Symposium on [online]. Wuhan, 2009 [cit. 4.11.2011]. ISBN 978-1-4244-4412-0. DOI: 10.1109/SOPO.2009.5230204. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5230204>
- [4] Werner Mehl [online]. 2008 [cit. 9.12.2011]. Dostupné z: <http://www.kurzeit.com/>
- [5] LIU, Ji a Lixia YU. Laser-based apparatus for measuring projectile velocity. In: *Electronic Measurement & Instruments*, 2009. ICEMI '09. 9th International Conference on [online]. Peking, 2009 [cit. 9.12.2011]. ISBN 978-1-4244-3864-8. DOI: 10.1109/ICEMI.2009.5274503. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5274503>
- [6] PROTOTYPA [online]. 2007 [cit. 9.12.2011]. Dostupné z: <http://www.prototypa.cz/menu1.html>
- [7] HPI [online]. [cit. 18.12.2011]. Dostupné z: <http://www.hpi-gmbh.com/>
- [8] Mechanism Analysis of Induction-Type Coil Target for Velocity Measurement. In: XIONG, Xian Feng, De Ren KONG a Xiao Feng RUAN. *Advanced Materials Research* [online]. 2011 [cit. 18.12.2011]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.301-303.666. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.301-303.666>
- [9] SPOHN, Daniel. Inductive Sensing for Velocity Measurement at a U.S. Air Force Laboratory. In: *Sensor* [online]. 1.9.1998 [cit. 18.12.2011]. Dostupné z: <http://www.sensormag.com/sensors/motion-velocity-displacement/inductive-sensing-velocity-measurement-a-us-air-force-labora-854>
- [10] RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 136 s. ISBN 80-010-3123-3.

[11] INA128 datasheet [online]. [cit.30.3.2012]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=ina128&fileType=pdf>

Seznam použitých zkratek a symbolů

v	Rychlost
l	Vzdálenost
t	Čas
H	Intenzita magnetického pole
L	Indukčnost
Φ	Magnetický tok
U	Napětí
I	Proud
R	Odpor
f	Frekvence
Δ	Absolutní chyba
δ	Relativní chyba

IET2 Institut experimentálních technologií 2

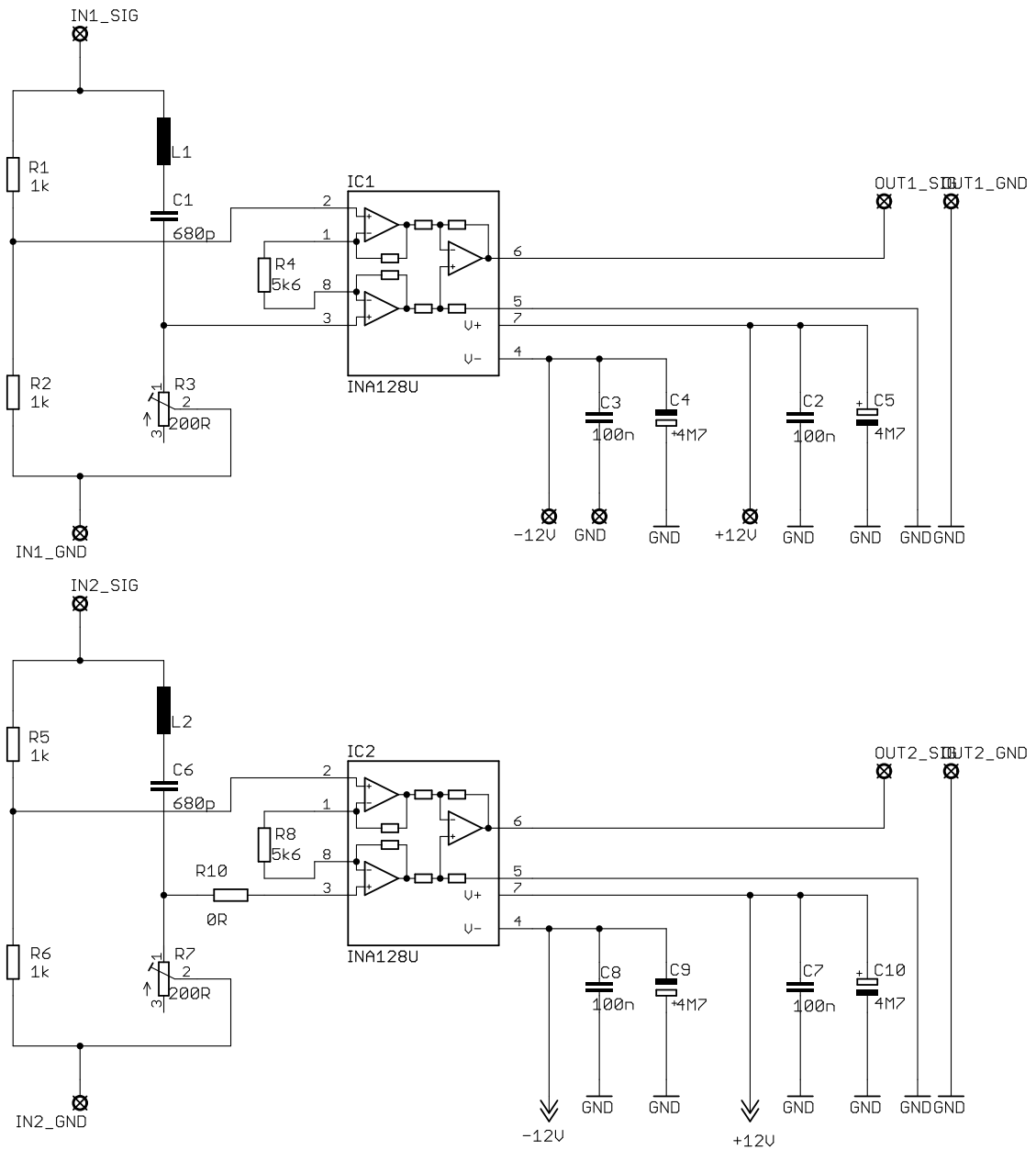
DPS deska plošného spoje

Seznam příloh

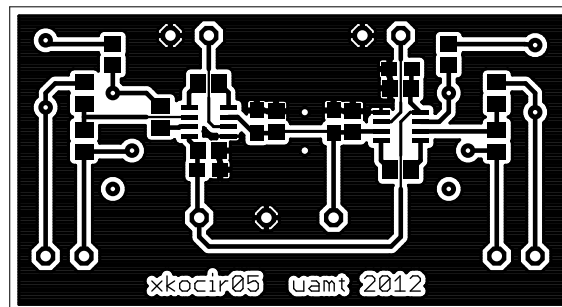
A – Zapojení elektroniky senzoru

B – DVD

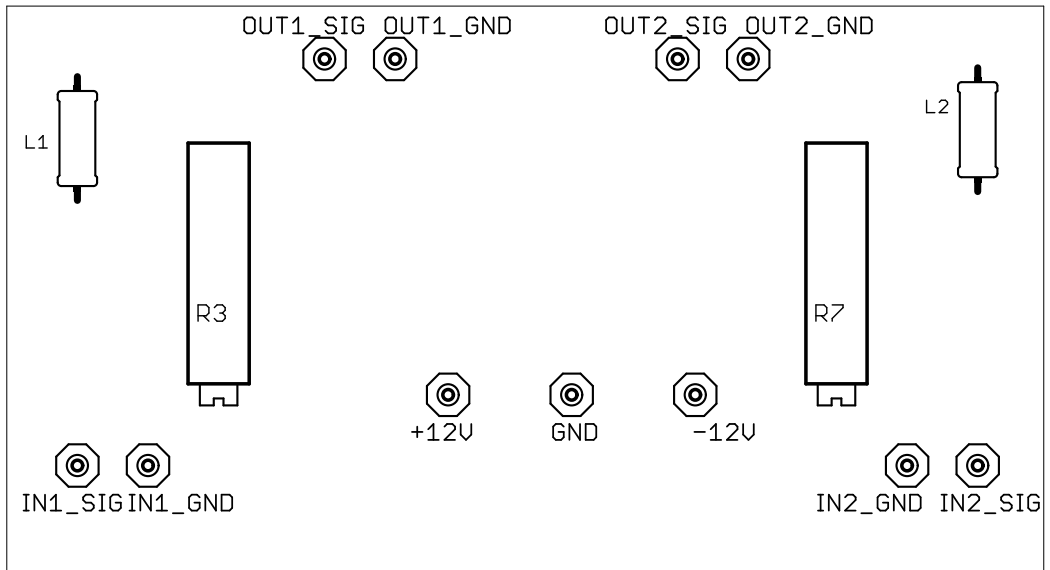
A – Zapojení elektroniky senzoru



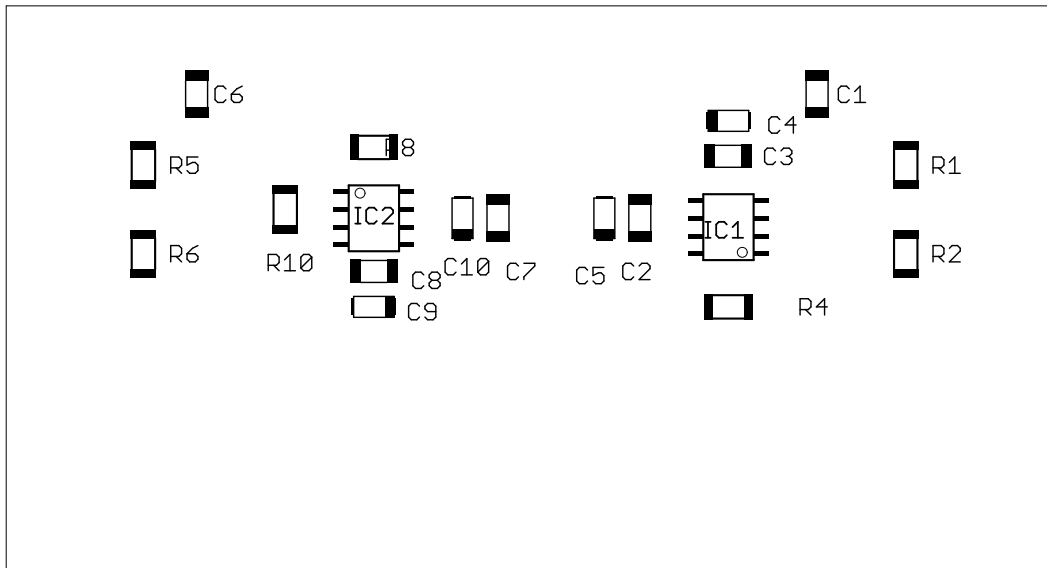
A. 1 - Schéma zapojení elektroniky senzoru



A. 2 - Deska plošného spoje



A. 3 - Osazovací výkres TOP



A. 4 - Osazovací výkres BOT

Název prvku	Hodnota	Počet	Popis	Pouzdro
L1, L2	-	2	Snímací cívky	-
R10	0R	1	Rezistor SMD	M1206
R1, R2, R5, R6	1k	4	Rezistor SMD	M1206
C4, C5, C9, C10	4M7	4	Kapacitor Tantalový SMD	SMC_A
R4, R8	5k6	2	Rezistor SMD	M1206
C2, C3, C7, C8	100n	4	Kapacitor keramický SMD	C1206
R3, R7	200R	2	Odporový trimr víceotáčkový	43P
C1, C6	680p	2	Kapacitor keramický SMD	C1206
IC1, IC2	-	2	Přístrojový zesilovač INA 128U	SO08

A. 5 - Seznam součástek