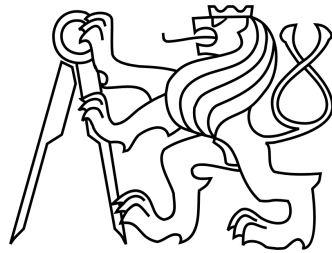


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Induktivní senzor

Autor: Miroslav Čermák

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Praha, 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Č E R M Á K Miroslav**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Obor: Aplikovaná elektronika

Název tématu: **Induktivní senzor**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte literaturu týkající se induktivních senzorů.
2. Na základě dle bodu 1 navrhnete a relizujete přípravek pro testování vlastností (zejména přesnost) induktivních senzorů pro měření lineárního posuvu (vzdálenosti). Pokuste se dosáhnout, co největší délky posuvu.
3. Provedte měření.
4. Vyhodnotte výsledky měření a dosažené parametry.
5. Doporučte případné další možnosti v zlepšení parametrů daných typů senzorů.

Seznam odborné literatury:

- [1] Faktor, Z.: Transformátory a cívky. BEN, Praha 1999.
[2] Foit, J.: LC Oscillator Has Stable Amplitude, Electronic Design News, Vol. 50, str. 93-96, říjen 2005.

Vedoucí: **Ing. Lubor Jirásek, CSc.**

Platnost zadání: 31. 8. 2015

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 22. 4. 2014

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování, nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne 22. května 2014

Miroslav Čermák

podpis

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Lubomíru Jiráskovi. CSc. za ochotu a odbornou pomoc při vypracovávání této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomáši Teplému za odborné konzultace.

Anotace Tato práce je zaměřena na indukčnostní senzor polohy, jeho navržení, sestavení a následné měření jeho vlastností. Hlavním cílem je dosáhnout co možná nejvyšší přesnosti při zachování velkého rozsahu měření. Snímačem je v tomto případě válcová cívka s pohyblivým jádrem, které svým pohybem mění vlastnosti magnetického obvodu, a tím indukčnost. Tato změna je převáděna LC oscilátorem na změnu frekvence oscilací, které jsou po upravení na vhodnou úroveň čítány mikrokontrolerem, který se zároveň stará o převedení frekvence na vzdálenost. Toho je dosaženo aproximací závislosti frekvence na posuvu jádra metodou nejmenších čtverců a uložení aproximačního polynomu v paměti mikrokontroleru pro potřeby výpočtu. Výsledek je zobrazován na displeji. Bylo dosaženo poměrně vysoké přesnosti, ovšem senzor má několik vážných nedostatků, které mu brání v praktickém využití.

Klíčová slova: Senzor, měření, oscilátor, mikrokontroler

Abstract This thesis is focused on the inductance position sensor, its design, assembly and subsequent measurement of its properties. The main objective is to achieve the highest possible accuracy while maintaining a large dynamic range. The sensor is in this case a cylindrical coil with movable core, the movement of which changes the properties of the magnetic circuit and the inductance. This change is converted via LC oscillator to the change of its oscillation frequency. Oscillator output is adjusted to a suitable voltage level and counted by microcontroller, which also handles converting the frequency to position. The conversion is achieved by least squares polynomial approximation of the frequency output which is dependent on the core position and the result is stored in the memory of the microcontroller. The result is displayed on the display. It reached a relatively high accuracy, but the sensor has several serious shortcomings that prevent practical use.

Keywords: Sensor, measurement, oscillator, microcontroller

OBSAH

Zadání práce	ii
Abstrakt	v
1. Úvod	3
2. Indukčnostní senzory	4
2.1. Základní problematika senzorů	4
2.1.1. Měřicí řetězec	4
2.1.2. Základní parametry senzorů	5
2.1.3. Statické vlastnosti senzorů	5
2.2. Základní typy indukčnostních senzorů	6
2.2.1. Indukčnostní senzory využívající vířivé proudy	7
2.2.2. Inukčnostní senzory s proměnnou vzduchovou mezerou	8
2.2.3. LVDT	9
3. Návrh analogové části senzoru indukčnosti	11
3.1. senzor	11
3.2. Měření indukčnosti senzoru	12
3.2.1. Měření indukčnosti z impedance	12
3.2.2. Měření LC oscilátorem	13
3.3. LC oscilátor	14
3.3.1. Základní charakteristika oscilátorů	14
3.3.2. LC oscilátor se stabilní amplitudou	16
3.3.3. Reálné parametry LC oscilátoru	20
3.4. Měření frekvence přímou metodou	20
4. Číslicová část senzoru indukčnosti	22
4.1. Komparátor	22
4.2. Čítač	23
4.3. Převod frekvence na vzdálenost	24

4.4. Zobrazovací jednotka	25
4.5. Převodník UART - USB	27
5. Měření senzoru	28
5.1. Převodní charakteristiky	28
6. Závěr	35
Literatura	37
Přílohy	I
A. Seznam použitých zkratk a symbolů	II
B. Deska plošných spojů	IV
B.1. Blok oscilátoru	IV
B.2. Blok mikrokontroleru	V
B.3. Vrstva TOP	VI
B.4. Vrstva BOT	VII
C. Zjednodušený vývojový diagram programu	VIII
D. Naměřená data	IX
E. Měřicí přípravek	XVI

ÚVOD

Už od nepaměti se člověk snažil co nejpřesněji a nejspolehlivěji měřit fyzikální veličiny. Objevy nových fyzikálních principů a rozvoj elektroniky a mechaniky daly za vznik několika třídám senzorů¹, které rozlišujeme převážně dle měřené veličiny a fyzikálního principu na kterém pracují, dále podle konkrétního mechanického a elektrického provedení.

Tato práce je zaměřena na induktivní senzor polohy, tedy na takový, jež měří změnu polohy předmětu v jedné ose a to skrze změnu své indukčnosti. Tento typ se používá převážně v lineárních posuvech pro přesné odměřování vzdálenosti, díky jejich velkému měřicímu rozsahu. Jako příklad z praxe bych uvedl LVDT², který se svou charakteristikou nejvíce blíží senzoru, kterým se zde zabývám, avšak jeho mechanická konstrukce a způsob vyhodnocení se liší.

Cíl této práce je sestavit co nejpřesnější senzor, změřit jeho vlastnosti, porovnat s ostatními senzory a popřípadě navrhnout zlepšení parametrů daného senzoru.

¹Jinak také převodníky, snímače, detektory.

²LVDT - linear variable differential transformer - transformátorový senzor polohy

INDUKČNOSTNÍ SENZORY**2.1. Základní problematika senzorů****2.1.1. Měřicí řetězec**

Měřicí řetězec je obecné uspořádání kompletního měřicího obvodu, jehož příklad je na obrázku 2.1. Senzor transformuje měřenou veličinu na elektrický signál, který je často potřeba zesílit.



Obrázek 2.1.: Blokové schéma měřicího řetězce se senzorem, A/Č - analogově číslicový převodník, MP - mikropočítač, R - rozhraní, P - nadřazený systém[15]

Měřicí obvod a zesilovač musí zajistit dostatečný odstup užitečného signálu ze senzoru od šumu. To je zajištěno pomocí speciálních zapojení zesilovačů, frekvenčním omezením signálu, jeho modulací a následnou demodulací, případně převodem a digitálním zpracováním signálu. Obvody pro zpracování signálů mohou obsahovat další analogové nebo digitální obvody pro další úpravu signálu, např. linearizační člen aj.

Výstup ze senzoru je v nejjednoduším případě analogový a může být zobrazován přímoukazujícím přístrojem, nebo zapisovačem. V dnešní době se však používají standardizovaná rozhraní pro sběr dat z jednotlivých senzorů, jako je například sériové rozhraní RS-232 a RS-485. Každé rozhraní má

vlastní komunikační protokol, definující způsob přenosu dat, adres a signálů potřebných pro bezchybnou komunikaci.

2.1.2. Základní parametry senzorů

Žádný senzor není ideální a je negativně ovlivňován celou řadou parametrů, které se dělí na statické a dynamické. Vliv těchto parametrů je možné snížit použitím vhodného zapojení a tím snížit celkovou chybu, která je vnášena do měření. Rozlišujeme následující základní parametry (převzato z [15]):

- Citlivost a její stabilita (multiplikativní chyby).
- Dynamický rozsah (rozsah měřených veličin pro specifikovanou nejistotu měření).
- Offset a jeho stabilita (aditivní chyby).
- Linearita.
- Hystereze, reprodukovatelnost.
- Rozlišitelnost (a šumové charakteristiky).
- Celková přesnost vyjádřená jako nejistota nebo toleranční pásmo (maximální chyba).
- Dynamické parametry (časová konstanta, šíře pásma, rychlost číslicového přenosu).
- Odolnost vůči prostředí (vibrace, mag. pole, ...).

2.1.3. Statické vlastnosti senzorů

„Statická převodní charakteristika senzoru je dána závislostí $y = f(x)$ mezi vstupní veličinou x a výstupní veličinou y v časově ustáleném stavu. Tuto závislost lze velmi často popsat polynomem:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (2.1)$$

Ideální statická charakteristika je dána vztahem:

$$y = Kx \quad (2.2)$$

nebo:

$$y = y_0 + K_1 x \quad (2.3)$$

Kde K je citlivost senzoru, většinou definována jako $K = dy/dx$ a y_0 je offset.“[15]

1. **Rozlišitelnost** senzoru je dána minimální hodnotou snímané veličiny, kterou je ještě senzor schopný na výstupu rozeznat od šumu. Odpovídá směrodatné odchylce šumu senzoru. U digitálních senzorů je rozlišitelnost rovna hodnotě nejnižšího bitu.
2. **Dynamický rozsah** je interval, který zahrnuje všechny hodnoty dané veličiny, jenž je senzor schopen měřit.
3. **Reprodukovatelnost** znamená jak moc se změní naměřená hodnota vlivem změny převodní charakteristiky, nebo mechanickými nepřesnostmi, po návratu do stejného bodu.
4. **Relativní chyba** je dána tímto vztahem, kde Δx je absolutní chyba:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_{max} - x_{min}} \quad (2.4)$$

5. **Offset** představuje aditivní chybu, která je způsobena posunem převodní charakteristiky senzoru. Dá se poměrně účinně kompenzovat.
6. **Chyba citlivosti** K je multiplikativní chyba. Jedná se o změnu převodní charakteristiky senzoru, například změna sklonu statické převodní charakteristiky.
7. **Přesnost senzoru** je vyjádřena absolutní chybou senzoru a udává se v procentech rozsahu.
8. **Chyba nelinearity** je odchylka od ideální lineární přenosové charakteristiky senzoru.
9. **Chyba hystereze** je závislost výstupu nejen na aktuálním vstupu, ale také na vstupech předešlých.

2.2. Základní typy indukčnostních senzorů

Jejich princip spočívá ve změně vlastní, nebo vzájemné indukčnosti vlivem změny polohy měřeného objektu. Rozlišujeme několik základních druhů in-

dukčnostních senzorů, jejichž změna indukčnosti závisí na konkrétním principu a geometrickém uspořádání senzoru. Používají se převážně pro měření vzdálenosti, nebo jako senzory přiblížení.

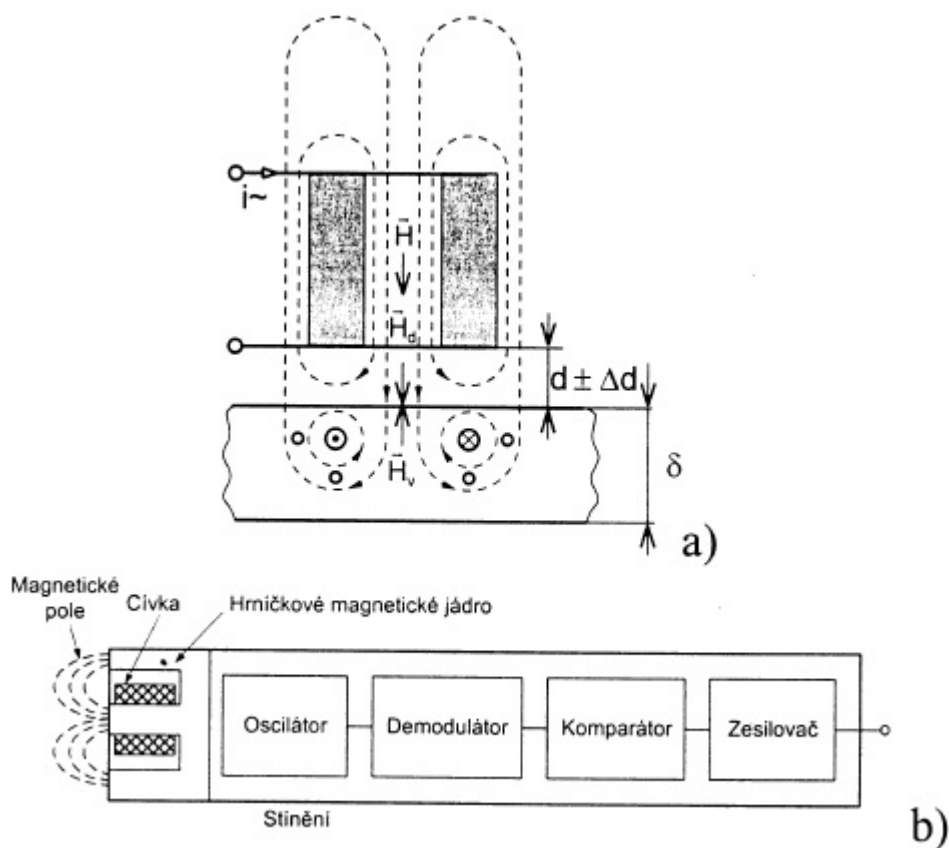
Impedance senzoru s cívkou o N závitů je určena obecně vztahem:

$$Z(j\omega) = R + \frac{N^2 \omega X_m}{|Z_m(j\omega)|^2} + j \frac{N^2 \omega R_m}{|Z_m(j\omega)|^2} \quad (2.5)$$

Druhý člen představuje ztráty vířivými proudy a hysterezí a třetí člen představuje indukčnost.

2.2.1. Indukčnostní senzory využívající vířivé proudy

Cívka vyzařuje střídavé magnetické pole H . Vlivem tohoto pole se ve vodivém materiálu s permeabilitou μ a rezistivitou ρ indukují vířivé proudy. Ty podle pravidel Lenzova zákona vytvoří magnetické pole o intenzitě H_v , působící proti vlastnímu poli cívky, jehož intenzita tím klesá, což se projeví ve změně indukčnosti budící cívky.



Obrázek 2.2.: Indukčnostní senzory s vířivými proudy: a) princip, b) typická konstrukce[15]

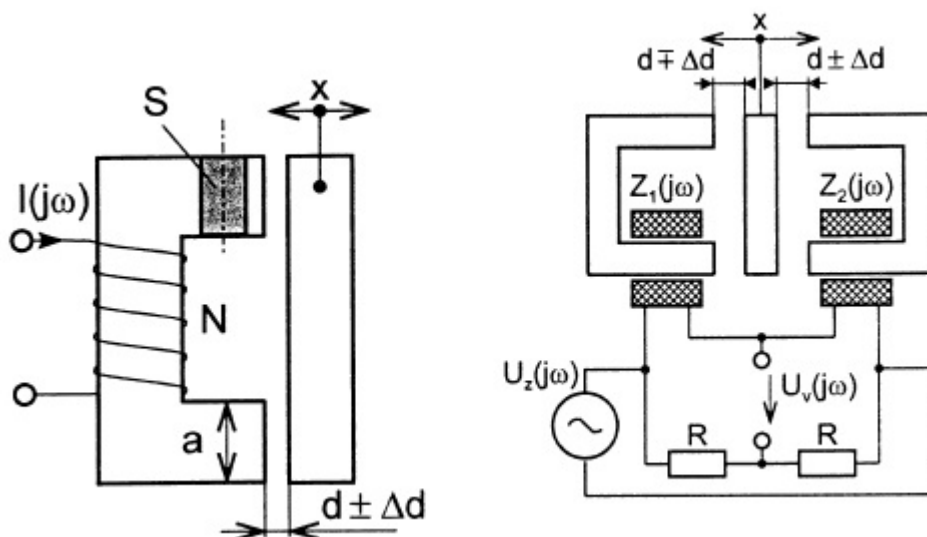
Intenzita povrchového jevu je popsána hloubkou vniku $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$. Ta odpovídá takové vzdálenosti pod povrchem vodivého tělesa, ve které se magnetické pole utlumí na $\frac{1}{e} = 37\%$ intenzity na povrchu. Při měření vzdálenosti se volí pracovní frekvence ω tak, aby výsledek nebyl závislý na tloušťce měřenoého objektu d , proto musí platit $d \gg \delta$.

Cívka senzoru bývá zpravidla navinuta na hrníčkovém jádře z feritu, jež zvyšuje citlivost a směrovost vyzařovaného pole. Používají se převážně jako senzory přiblížení s dvoustavovým výstupem.

2.2.2. Indukční senzory s proměnnou vzduchovou mezerou

Využívá závislost magnetického odporu na změně vzduchové mezery. Se změnou polohy předmětu se mění vzduchová mezera v rozmezí $d + \Delta d$. V případě, že vzduchová mezera je o hodně menší než rozměry senzoru ($d \ll a$), je přípustné zanedbat rozptylový tok mimo vzduchovou mezeru a pro frekvence přibližně do 10 kHz i vliv ztrát ve feromagnetiku. Potom je magnetický odpor reálný a platí:

$$R_m = \sum_i \frac{l_i}{\mu_i S_i} = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \mu_r S_{Fe}} + \frac{2d}{\mu_0 S_d} \rightarrow \frac{2d}{\mu_0 S_d} \quad (2.6)$$



Obrázek 2.3.: Indukční senzor se vzduchovou mezerou v klasickém a diferenciálním provedení [15]

První člen výrazu, který představuje ztráty ve feromagnetiku můžeme zanedbat, protože permeabilita feromagnetických materiálů je o několik řádů

vyšší než permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$. Pro výslednou indukčnost tedy můžeme uvažovat vztah:

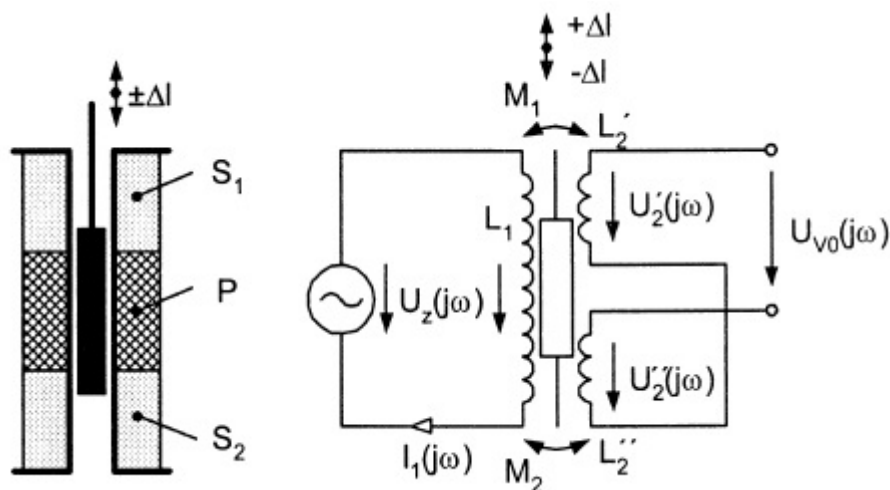
$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2}{2d} \mu_0 S_d \quad (2.7)$$

Závislost indukčnosti na změně vzduchové mezery je nelineární, proto se senzor používá pro měření velmi malých posuvů. Pro zlepšení jeho vlastností se používá diferenciální uspořádání, které dosahuje dvojnásobné citlivosti a zlepšuje linearitu senzoru.

2.2.3. LVDT

Skládá se ze tří cívek, jedné primární a dvou sekundárních. Cívky jsou navinuté jako solenoidy na kostru, ve které je umístěno pohyblivé, válcové feromagnetické jádro, jenž je připevněno k měřenému objektu. Primární vinutí je napájeno střídavým proudem, indukuje napětí v sekundárních vinutích a toto napětí je úměrné délce jádra, které je spojuje. Vývody sekundárních vinutí jsou zapojeny tak, že se jejich napětí navzájem odečítají.

V základní poloze jádro zasahuje do poloviny délky obou sekundárních cívek, výstupní napětí je tedy nulové. Při posunu jádra dojde ke zvýšení napětí na cívce ve směru pohybu jádra a snížení napětí na opačné cívce. Směr pohybu jádra je tedy dán fází výstupního napětí a vzdálenost jeho amplitudou.



Obrázek 2.4.: Lineární diferenciální transformátorový senzor polohy[15]

Pro zpracování tohoto signálu se používá fázově citlivý usměrňovač. Ideálně by v základní poloze jádra mělo být na výstupu nulové napětí, ale vlivem

vyšších harmonických primárního proudu a parazitní kapacitní vazby mezi primárními a sekundárními vinutími je nenulové.

LVDT dosahuje výborné linearitě a přesnosti ve velkém rozsahu.

NÁVRH ANALOGOVÉ ČÁSTI SENZORU INDUKČNOSTI

3.1. senzor

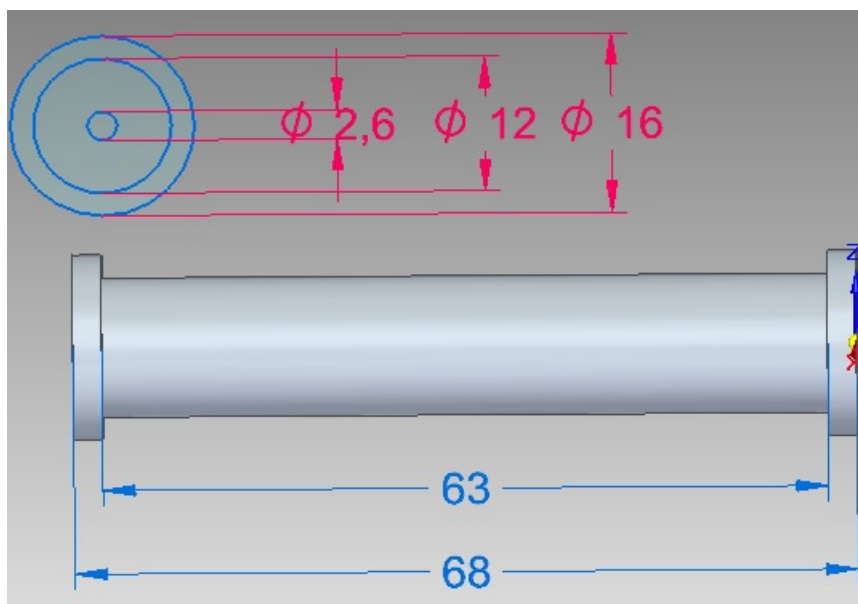
Hlavní požadavky na senzor jsou velká přesnost a co největší měřící rozsah. Po shrnutí základních typů indukčnostních senzorů popsaných v sekci 2.2, se těmto požadavkům svými vlastnostmi nejvíce blíží transformátorový senzor polohy - LVDT. Jeho konstrukce v diferenciálním provedení je však velmi složitá a vyžaduje pokud možno co nejlepší symetrii sekundárních cívek. Proto jsem se rozhodl pro samostatnou cívku, což značně zjednoduší konstrukci senzoru.

Základním principem senzoru je změna vlastní indukčnosti, která je zajištěna změnou parametrů jádra. Jádro je posouváno ve směru osy cívky, tím se mění uspořádání magnetického obvodu a tedy i vlastní indukčnost. Podle statické definice indukčnosti platí pro solenoid:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 \pi r^2}{h} \quad (3.1)$$

Kde L je vlastní indukčnost cívky, N je počet závitů cívky, r je poloměr cívky, h je délka cívky a μ_0 a μ_r je permeabilita vakua a relativní permeabilita.

Značným problémem se ukázalo být sehnání tyčového jádra vhodné velikosti s velkou permeabilitou. Nakonec bylo zvoleno feritové jádro z materiálu H11 od firmy Pramet, které má relativní permeabilitu $\mu_r = 1100$, rozměry 2x32 mm a 2,6x25mm. Pro zvětšení měřícího rozsahu bylo nutné prodloužit jádro, čehož bylo dosaženo slepením dvou menších kusů. Slepění sice způsobilo nehomogenitu feritového vzorku, ale ne příliš významnou z hlediska měření.



Obrázek 3.1.: Návrh cívky v programu Solid Edge, rozměry v mm

Při posuvu jádra z nulové polohy u tohoto typu senzoru nejsme schopni určit směr posuvu, protože výstup je téměř symetrický na obě strany. Proto definujeme nulovou polohu při částečném vysunutí jádra, tím se bude indukčnost při zasunutí zvětšovat a při vysunutí zmenšovat. Zároveň tím stanovíme měřící rozsah senzoru, protože změna indukčnosti není v celém pásmu lineární, a proto je potřeba převodní charakteristiku senzoru uvažovat jen v určitém pásmu hodnot a aproximovat ji.

3.2. Měření indukčnosti senzoru

3.2.1. Měření indukčnosti z impedance

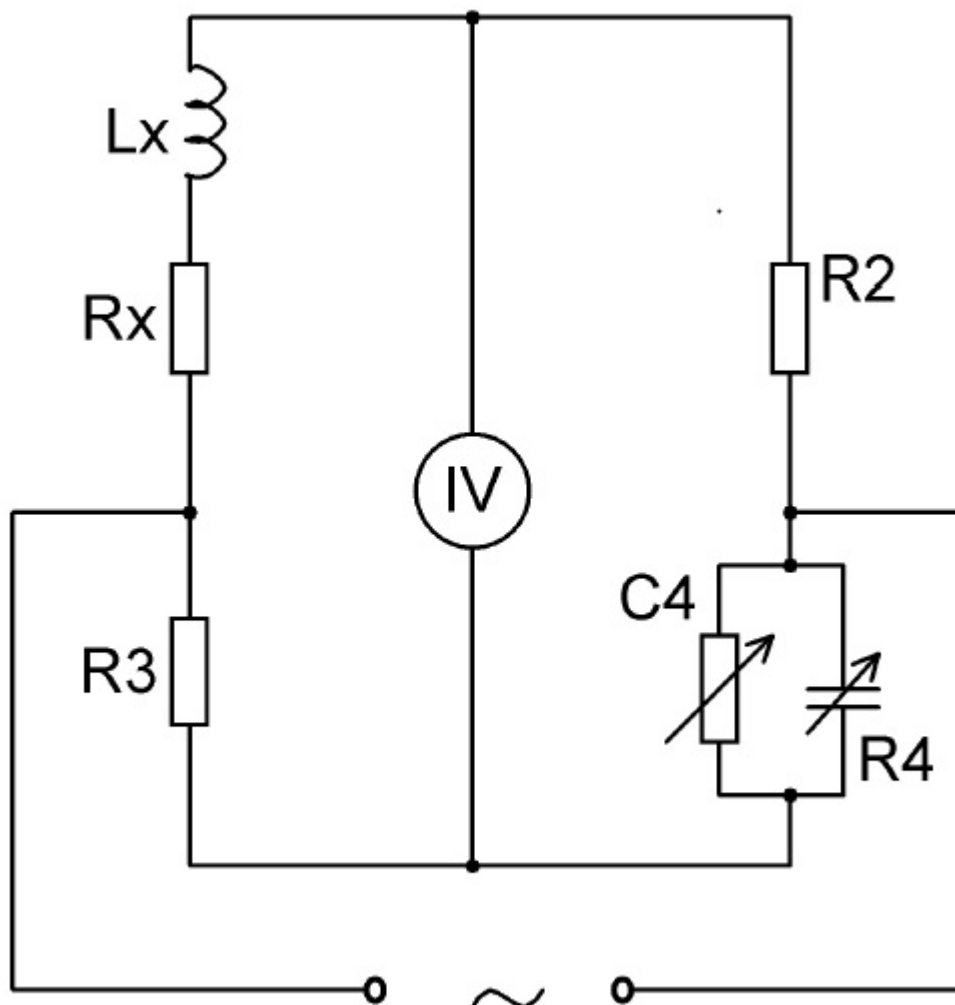
Pro měření impedancí je možné použít můstek Wheatstoneova typu. Konkrétně k měření indukčnosti se používá Maxwellů - Wienův můstek, který je na obr. 3.2.

V tomto případě při rovnovážném stavu můstku platí:

$$(R_x + j\omega L_x) \frac{R_4}{j\omega C_4 + 1} = R_2 R_3 \quad (3.2)$$

A po následující úpravě tohoto výrazu a oddělení reálné a imaginární složky výrazu můžeme uvést vztahy:

$$L_x = C_4 R_2 R_3 \text{ a } R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} \quad (3.3)$$



Obrázek 3.2.: Maxwellův - Wienův můstek pro měření impedance

Při vyvažování můstku jsou obě složky vyvažovány nezávisle na sobě a vyvážení není závislé na frekvenci. Nevýhodami metody je potřeba napájet můstek střídavým napětím, nízká přesnost a problémy se stíněním.

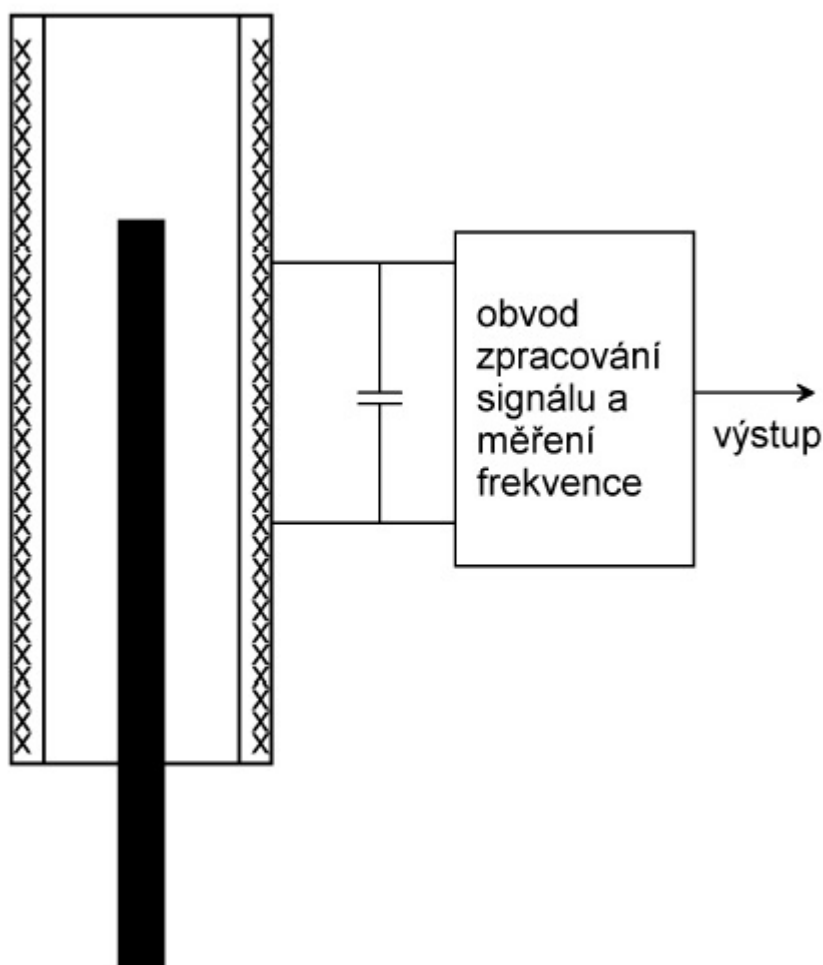
3.2.2. Měření LC oscilátorem

Další metoda pro měření indukčnosti využívá LC oscilátor, jehož kmitočet oscilací f_0 je dán indukčností cívky L a kapacitou kondenzátoru C , podle známého Thomsonova vztahu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

Zjednodušené blokové zapojení této metody je na obr. 3.3. Oproti měření na Maxwellově - Wienově můstku má tato metoda větší citlivost, je tedy pro

naše účely vhodnější a dále se proto budeme zabývat vlastnostmi této metody.



Obrázek 3.3.: Zjednodušený princip měření pomocí LC oscilátoru

3.3. LC oscilátor

Na doporučení vedoucího práce jsem použil laditelný LC oscilátor se stabilní amplitudou, převzatý od p. doc. J. Foita z jeho článku v magazínu EDN[2].

3.3.1. Základní charakteristika oscilátorů

Základními komponenty zpětnovazebního oscilátoru jsou zesilovač, prvek limitující amplitudu, systém udávající frekvenci a zpětnovazební systém. Zesilovač často slouží jako limitující prvek amplitudy a systém, který udává frekvenci v sobě obvykle zahrnuje i zpětnovazební funkci.

Na obr. 3.4 je schéma základního zpětnovazebního obvodu. Napěťový zisk zesilovače je $A_v(j\omega)$ a systém napěťové zpětné vazby je popsán přenosovou funkcí $\beta(j\omega)$. Pro popsání tohoto obvodu uvedeme několik základních vztahů:

$$v_o = A_v(j\omega)v_d \quad (3.5)$$

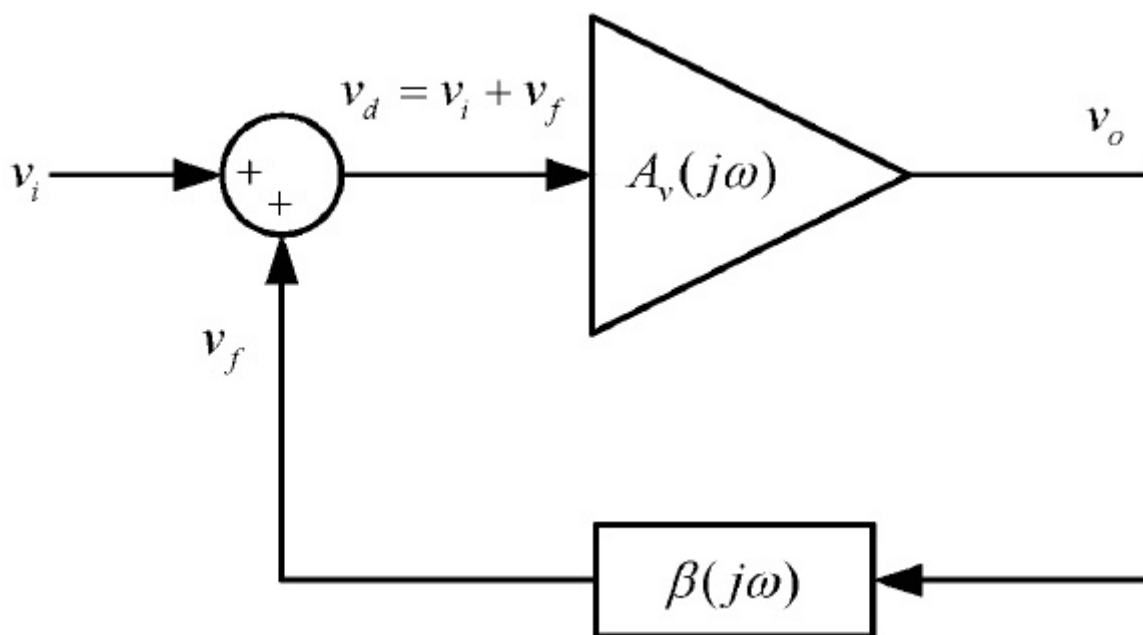
$$v_f = \beta(j\omega)v_o \quad (3.6)$$

$$v_d = v_i + v_f \quad (3.7)$$

Tedy podle 3.5 a 3.6 je napěťový zisk v uzavřené smyčce $A_{vf}(j\omega)$ dán vztahem:

$$A_{vf}(j\omega) = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_v(j\omega)}{1 - \beta(j\omega)A_v(j\omega)} \quad (3.8)$$

Kde veličina $\beta(j\omega)A_v(j\omega)$ je označována jako zesílení smyčky.



Obrázek 3.4.: Základní zpětnovazební obvod[4]

Aby obvod správně oscilloval, na výstupu musí být přítomen signál i bez připojeného vstupu. Pokud však má být vstupní signál $v_i = 0$ je jasné, že jmenovatel vztahu 3.8 musí být nulový, aby na výstupu byl omezený signál v_o . Musí tedy platit:

$$1 - \beta(j\omega)A_v(j\omega) = 0$$

$$\beta(j\omega)A_v(j\omega) = 1 \quad (3.9)$$

Rovnice 3.9 je lépe známa jako Barkhausenova podmínka oscilací a vyjadřuje, že zesílení otevřené smyčky musí být jednotkové.

Dále musí platit fázová podmínka, která říká, že celkový fázový posun v uzavřené smyčce musí být 0° nebo násobek 360° , tím je splněn požadavek kladné zpětné vazby.

3.3.2. LC oscilátor se stabilní amplitudou

Tento oscilátor nám výrazně zjednoduší stavbu senzoru, protože nevyžaduje kapacitní či induktivní odbočky v LC obvodu, obejde se bez transformátorové vazby a jedna strana LC obvodu je uzemněna. Z těchto vlastností vyplývá, že dostaneme obvod, který dokáže efektivně upravovat zesílení smyčky tak, aby byla splněna základní Barkhausenova podmínka oscilací 3.9.

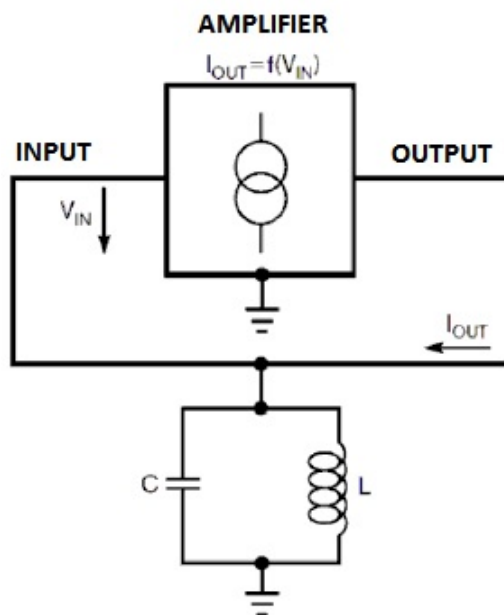
Na obr. 3.5 je základní princip funkce oscilátoru. Horní blok je zesilovač, pracující jako neinvertující napěťově řízený zdroj proudu. LC obvod převádí výstupní proud zesilovače, I_{out} , zpět na napětí, V_{in} , které opět přivádí na vstup zesilovače. Vztah 3.10 určuje podmínky oscilací:

$$A_O = \frac{I_{OUT}R_D}{V_{IN}} \geq 1 \quad (3.10)$$

V této rovnici je A_O celkové napěťové zesílení a R_D je dynamický odpor LC obvodu při rezonanční frekvenci.

V zesilovacím bloku z obr. 3.5 se používá několik druhů zapojení. Nejčastější z nich jsou zapojení se společným emitorem, nebo sourceem, které však mají dvě velké nevýhody. Jedná se o invertující zesilovač a jeho výstup se nechová jako dobrý zdroj, zvláště pak při velké zátěži. Tyto problémy se řeší zahrnutím transformátorových vazeb, nebo odboček v LC obvodu, které komplikují zapojení. Zvláště v našem případě, kdy využíváme cívku jako senzor, jsou tyto metody krajně nevhodné.

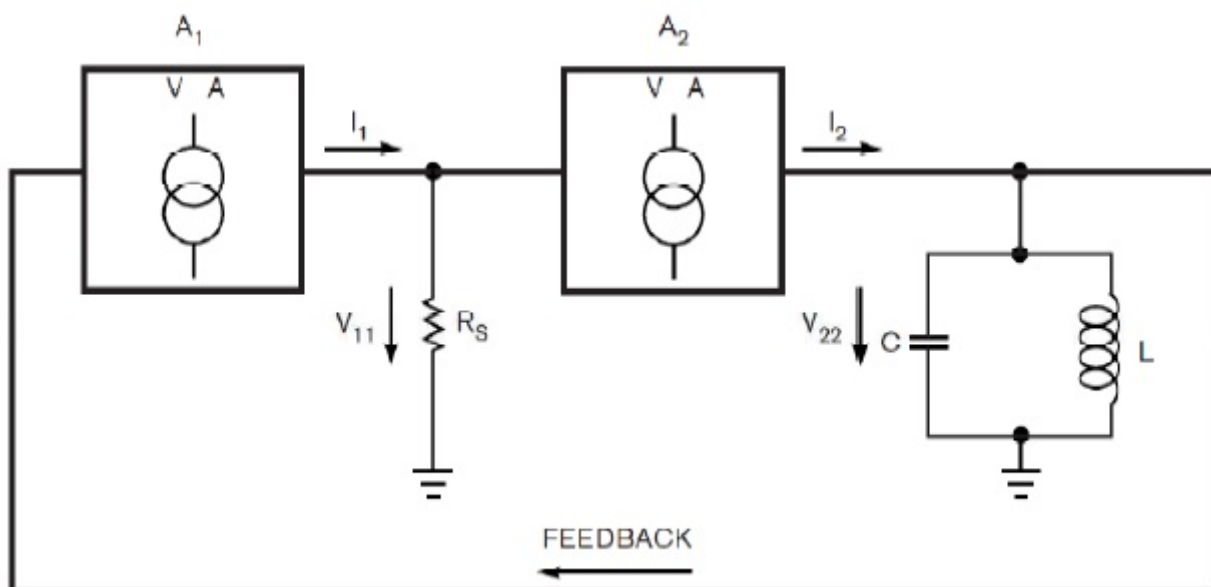
Další zapojení, které je na obr. 3.6 představuje dva neinvertující zesilovače A_1 a A_2 , řazené kaskádně za sebou, jako převodníky napětí na proud. Vazební rezistor R_s převádí výstupní proud, I_1 , zesilovače A_1 na napětí V_{11} , které budí druhou úroveň, A_2 . Dynamický odpor laděného LC obvodu převede výstupní proud z A_2 na výstupní napětí V_{22} , které je kladnou zpětnou vazbou přivedeno zpět na vstup A_1 . Pro splnění oscilační podmínky musí platit $A_1A_2 > 1$ z rovnice (3.10) pro všechny hodnoty dynamického odporu $R_D = Q\omega L$. V praxi to znamená, že LC oscilátor musí pracovat:



Obrázek 3.5.: Paralelní LC obvod a převodník napětí na proud[2]

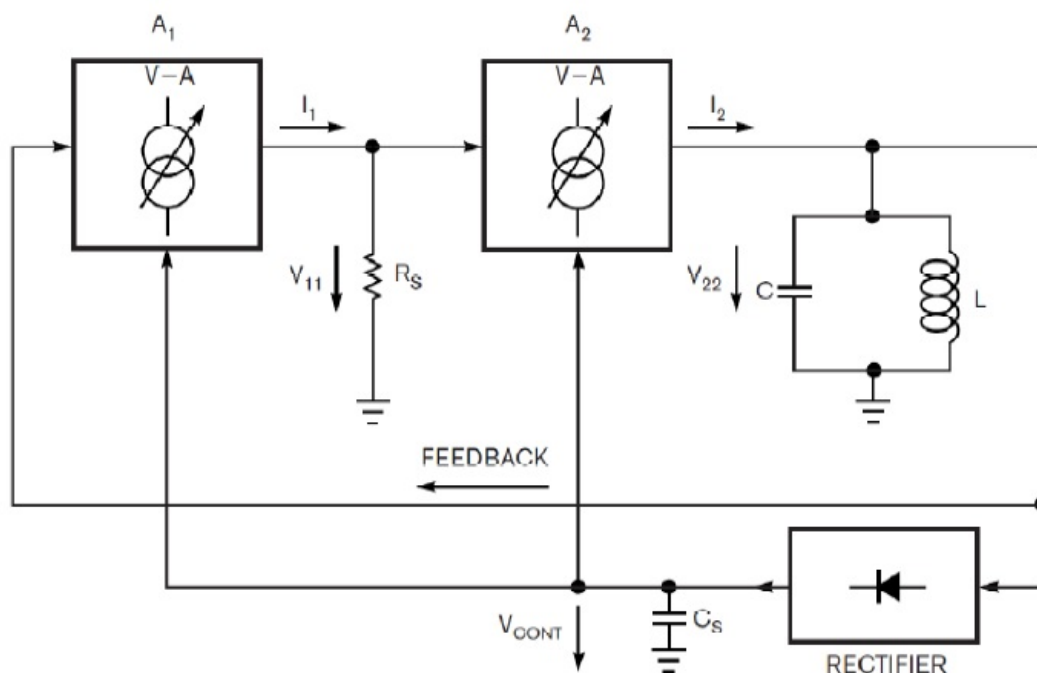
1. Se širokou škálou ladících indukčností a kapacit.
2. S velkým rozsahem činitele jakosti Q , který je určen především cívkou.

Na výstupu musí být konstantní amplituda při jakékoli kombinaci výše uvedených podmínek a co nejlepší stabilita frekvence vůči napájecímu napětí a zátěži.



Obrázek 3.6.: Zapojení s druhým blokem zesilovače[2]

Na obr. 3.7 je zapojení, které odvádí externí stejnosměrný signál z výstupu druhého bloku zesilovače přes zápornou zpětnou vazbu do obou zesilovačů. Tím je zajištěno ovládání zesílení obou bloků a amplituda výstupu je konstantní ve velkém frekvenčním pásmu.



Obrázek 3.7.: Oscilátor s řídicí zpětnou vazbou[2]

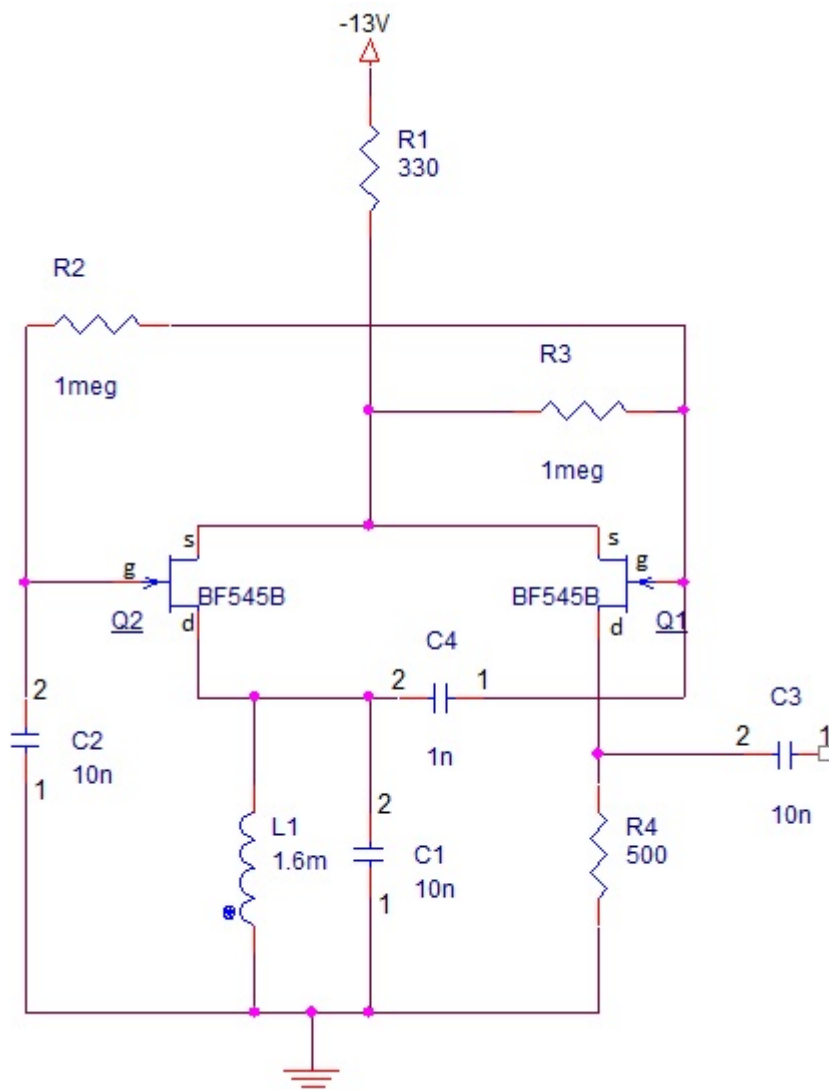
Realizace zesilovacích bloků A_1 a A_2 vyžaduje dodržení několika základních požadavků na jejich vlastnosti:

- Bloky musí být neinvertující.
- Neměly by odebírat téměř žádný proud.
- Vstupy řízené napětím.
- Zesílení na stejnosměrný řídicí signál by mělo být lineární.

Pro tento účel byly zvoleny N-kanálové JFETy BF245B, s proudem $I_D = 5\text{ mA}$ při $U_{GS} = 0$ a $U_{DS} = 15\text{ V}$. Tranzistor Q_2 pracuje v zapojení se společným drainem jako blok A_2 , tranzistor Q_1 je zapojen se společným gatem jako blok A_1 .

Přechod gate-source tranzistoru Q_1 usměrňuje střídavé napětí V_{22} , skrze laděný obvod. Vazební kondenzátor C_4 se chová zároveň jako vyhlazovací kondenzátor C_5 na obr. 3.7, jelikož jedna jeho elektroda je stejnosměrně uzemněna přes cívku L_1 . Gate tranzistoru Q_2 je stejnosměrně řízen přes rezistor R_2 .

Kondenzátor C_2 uzemňuje střídavé signály z gatu tranzistoru Q_2 , který je zapojen se společným gatem, protože source tranzistoru Q_1 řídí source tranzistoru Q_2 .

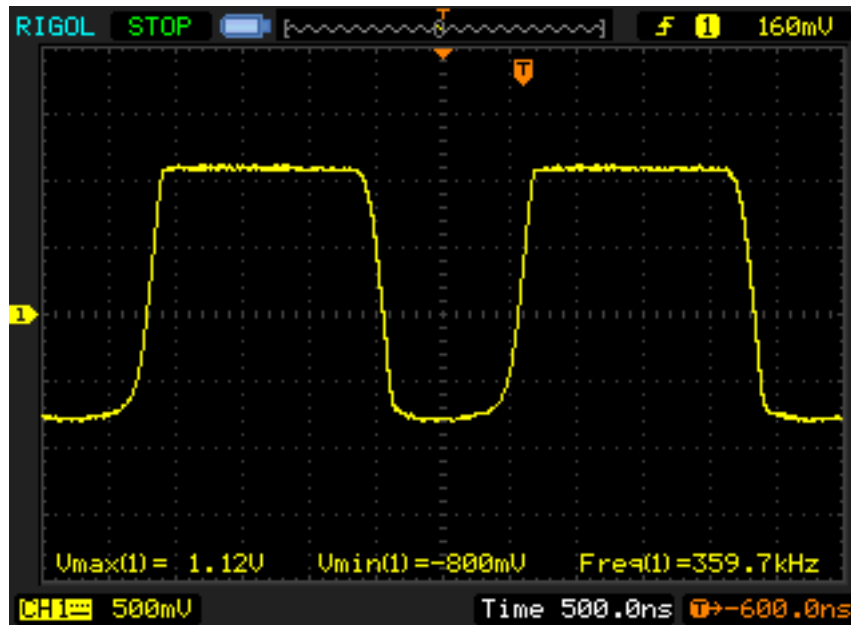


Obrázek 3.8.: Finální zapojení LC oscilátoru

V zapojení byly upraveny velikosti kondenzátorů a odporu R_4 tak, aby odpovídaly zvolenému frekvenčnímu pásmu a aby byla na výstupu dostatečná amplituda pro komparaci napětí na vstupu mikrokontroleru. Jelikož byla ukončena produkce tranzistorů BF245B, bylo nutno najít náhradu v tranzistorech BF545B, které mají podobné vlastnosti a zároveň se vyskytují v pouzdech vhodných pro povrchovou montáž.

3.3.3. Reálné parametry LC oscilátoru

Na výstupu oscilátoru je signál se stabilní amplitudou v širokém frekvenčním pásmu, které volíme změnou hodnoty kondenzátoru C_1 . Konstantní napájecí napětí oscilátoru udržuje regulátor LM337, který dodává do obvodu -13V. Umožňuje tak obvod napájet napětím v rozmezí -16 až -37V.



Obrázek 3.9.: Výstupní signál oscilátoru

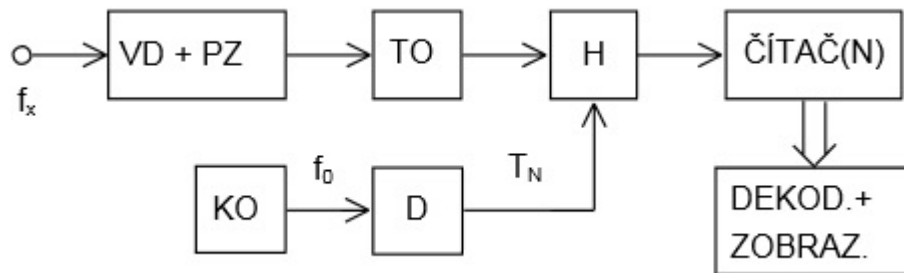
3.4. Měření frekvence přímou metodou

Na výstupu oscilátoru je potřeba měřit jeho frekvenci. Existuje několik metod měření frekvence, nejzákladnější z nich je měření pomocí čítače. Vybral jsem metodu přímého měření frekvence, která je přesnější pro měření vyšších frekvencí. Blokové zapojení je na obr.3.10. Signál může být v případě potřeby zesílen a na vstupu dělen. Dále je tvarován na pulsy úrovně vhodné pro vstup čítače. Hradlo je otevřeno přesně definovanou dobu T_N , během které čítač počítá pulzy. Výsledná frekvence f_x je tedy dána počtem načítaných pulzů N za dobu T_N .

$$f_x = \frac{N}{T_N} \quad (3.11)$$

Změnou doby měření T_N , která je dána frekvencí oscilátoru a dělicí konstantou děličky můžeme měnit přesnost měření. Čítání pulzů po dobu dekadické

kých násobků, nebo podílů jedné sekundy a následným podílem, nebo násobkem dekadickou konstantou, získáme výslednou hodnotu buď o řád přesnější, či méně přesnou. Nevýhodou této metody je průměrování hodnot při jejich měření. Pokud se tedy nebude měřená vzdálenost měnit skokově, což je fyzikálně nemožné, je potřeba nechat hodnotu ustálit, popřípadě snížit dobu otevření hradla, tím však snížíme přesnost.



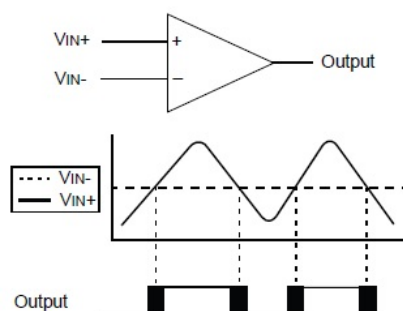
Obrázek 3.10.: Blokové schéma čítače v režimu měření frekvence, VD - vstupní dělič, PZ - předzesilovač, TO - tvarovací obvod, H - hradlo, KO - krystal oscilátoru, D - dělička[6]

ČÍSLICOVÁ ČÁST SENZORU INDUKČNOSTI

Tato kapitola je zaměřená na funkce mikrokontroleru, který se stará o čtení, zpracování a zobrazení dat. Použil jsem mikrokontroler **PIC18F25K22** od firmy Microchip, což je menší verze typu PIC18F45K22. Řada 18 poskytuje veškeré funkce, výpočetní výkon a periferie, které jsou potřeba k obsluze senzoru. Čip může být kdykoli přeprogramován, což umožňuje vhodně zvolit jeho parametry podle potřebných nároků na přesnost a rychlost měření. Dále je možnost implementovat do čipu bootloader. Tím odpadáva nutnost vlastnit programovací zařízení a uživateli stačí obyčejný USB kabel a jednoduchá aplikace v PC.

4.1. Komparátor

Blok komparátoru slouží k úpravě výstupního signálu oscilátoru na vhodnou úroveň pro bezchybné čítání vnitřním čítačem. Na obrázku 4.1 je vidět ele-



Obrázek 4.1.: Základní funkce komparátoru[13]

mentární princip tohoto obvodu, a tím je porovnávání dvou napětí. Vstup V_{IN+} je připojen na referenční napětí, které porovnává s výstupem oscilátoru připo-

jeným na V_{IN-} . Na výstupu komparátoru dostaneme tvarované obdelníkové pulzy se strmými hranami, které jsou vhodné pro připojení na vstup interního čítače.

4.2. Čítač

V mikrokontroleru jsou přítomny tři typy časovačů. Nejvhodnější z nich pro funkci čítače je timer0, který má následující parametry:

- Nastavení čítače v 16-ti bitovém módu, tedy maximální hodnota 65535.
- 8-mi bitová programovatelná dělička kmitočtu.
- Volitelný hodinový signál.
- Možnost čtení i zápisu jeho registrů.
- Volba náběžné, nebo sestupné hrany externího hodinového signálu.
- Vyvolání přerušení při přetečení.

Jak už bylo zmíněno v sekci 3.4, je zde použita metoda přímého měření frekvence, musíme tedy vstup čítače řídit. Hradlo z obrázku 3.10 je zde řešeno softwarově. Nejdříve je spuštěn čítač a následně se pomocí smyčky obsahující prázdnou instrukci NOP odměří časový úsek, který je dán počtem opakování smyčky. K měření časových úseků mikrokontrolerem nám tedy stačí znát frekvenci oscilátoru, ze které určíme dobu trvání jedné instrukce:

$$f_{ins} = \frac{f_{osc}}{4} = \frac{32000000}{4} = 8 \text{ MHz} \quad (4.1)$$

$$T_{ins} = \frac{1}{f_{ins}} = 125 \text{ ns} \quad (4.2)$$

V našem případě je doba trvání jedné instrukce 125 ns. Pro programové zpoždění tedy vytvoříme smyčku s prázdnou funkcí NOP a počtem opakování osm milionů, abychom dosáhli zpoždění trvajícím jednu sekundu.

Čítač je 16-ti bitový, jeho maximální hodnota je tedy 65535 a při vyšších frekvencích LC oscilátoru dojde i k několikanásobnému přetečení. Je několik možností jak problém přetečení řešit. Před vstup čítače může být zařazena dělička kmitočtu, tím zmenšíme celkový počet načítaných pulzů tak, aby čítač nepřetekl, ovšem zároveň snížíme rozlišovací schopnost celého senzoru o dělicí poměr. Vhodnější metoda je použití přerušení, které čítač při přetečení

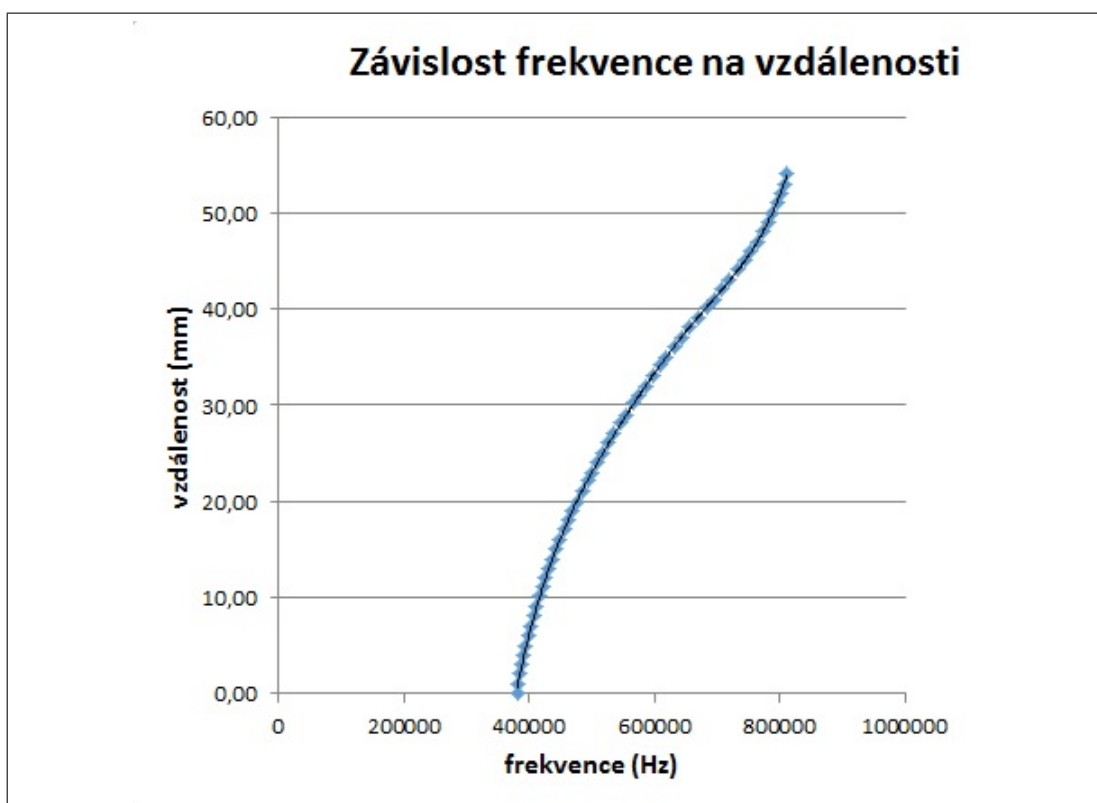
automaticky generuje. Po dobu běhu zpoždovací smyčky zjišťujeme celkový počet přetečení. Pokud při každém přetečení inkrementujeme proměnnou i , výsledný vztah pro frekvenci je:

$$f_{LC} = TMR0 + (i * 65535) \quad (4.3)$$

kde f_{LC} je výsledná frekvence LC oscilátoru, $TMR0$ je aktuální hodnota čítače a i je celkový počet přetečení čítače.

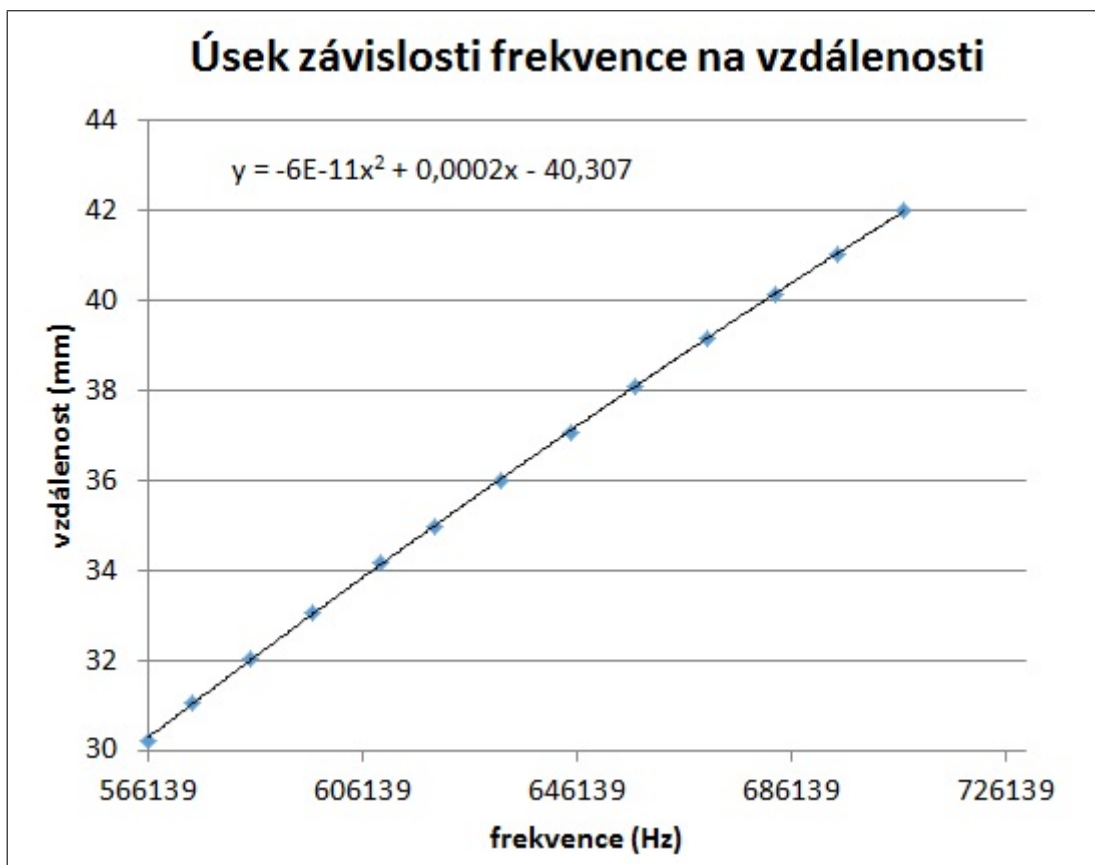
4.3. Převod frekvence na vzdálenost

Nyní je potřeba převést naměřenou frekvenci LC oscilátoru na vzdálenost. Protože není známá přesná převodní charakteristika senzoru, použijeme regresní analýzu pro získání této charakteristiky z naměřených hodnot. Závislost vzdálenosti na frekvenci odhadneme pomocí metody nejmenších čtverců. V následujícím grafu je vidět aproximace polynomem 3. řádu v programu Excel:



Obrázek 4.2.: Aproximace polynomem 3. řádu

Pro přesnější aproximaci je vhodné vybrat pouze část grafu uprostřed, kde se závislost nejvíc blíží lineární závislosti. Tento případ je znázorněn v následujícím grafu:



Obrázek 4.3.: Aproximace úseku polynomem 2. řádu

Výsledek aproximace dostaneme ve tvaru:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m = \sum_{j=0}^m a_jx^j \quad (4.4)$$

kde $y(x)$ je výsledná vzdálenost, x je hodnota naměřené frekvence, a_j jsou koeficienty vypočítané metodou nejmenších čtverců. K aproximaci pomocí metody nejmenších čtverců jsem použil univerzální nástroj pro kreslení grafů[8], jehož výpočet se ukázal být přesnější než v programu Excel.

4.4. Zobrazovací jednotka

Pro účel zobrazování hodnot bohatě postačí dvouřádkový alfanumerický LCD¹ displej GDM1602A, který obsahuje řadič HD44780 od firmy HITACHI. Ten k ovládání displeje používá sadu registrů a pamětí, jejichž funkce zde rozebereme:

¹Liquid crystal display - displej s tekutými krystaly

- **DDRAM²** - ukládá data pro zobrazení v osmi-bitových znakových kódech. Její úplná kapacita je 80 x 8, neboli 80 znaků, ovšem u dvouřádkového displeje s 16 znaky není plně využita a pro správné zobrazení je třeba znát rozložení adres na displeji, které je na obr. 4.4.

Display position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
DDRAM address	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F
	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	4A	4B	4C	4D	4E	4F

Obrázek 4.4.: Adresy DDRAM odpovídající polím displeje

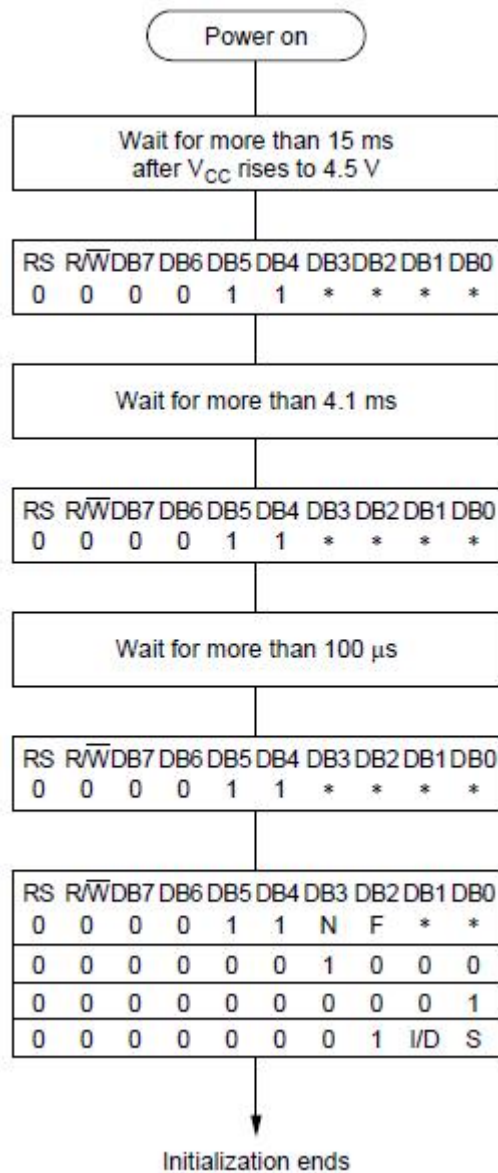
- **CGROM³** - generuje znaky podle 8-mi bitových znakových kódů.
- **CGRAM** - umožňuje uživateli definovat v paměti vlastní znaky, což však pro naše účely není potřeba.
- **Datový registr (DR)** - dočasně se v něm ukládají data při čtení z pamětí, nebo při zápisu do nich.
- **Instrukční registr (IR)** - ukládají se v něm kódy instrukcí, jako je například vymazání displeje a jsou do něj ukládány adresy pro DDRAM a CGRAM. Může do něj být zapsáno pouze ze strany mikrokontroleru.
- **Čítač adres (AC)** - přiřazuje adresy oběma pamětím DDRAM i CGRAM. Když je do instrukčního registru zapsána adresa instrukce, je zároveň poslána čítači adres. Volba paměti (DDRAM nebo CGRAM) je také určena instrukcí. Po zapsání, nebo po přečtení se čítač adres inkrementuje, nebo dekrementuje o jednotkovou hodnotu.

Před zápisem je nejdříve potřeba displej inicializovat přesně daným sledem instrukcí s daným časovým odstupem mezi nimi. Inicializací volíme základní funkce displeje, jako je počet zobrazovaných řádků (N), inkrementaci, nebo dekrementaci kurzoru, viditelnost kurzoru, nastavení velikosti fontu a datového rozhraní, které je v našem případě 4-bitové. Instrukce tedy musíme posílat po dvou 4-bitových částech.

Nyní je displej připraven přijímat a zobrazovat hodnoty, které jsou mu posílány jako jednotlivé znaky řetězce v daných časových intervalech.

²Display data random access memory - paměť náhodného přístupu obsahující zobrazovaná data

³Character generator ROM - znaky generující paměť určena pouze pro čtení



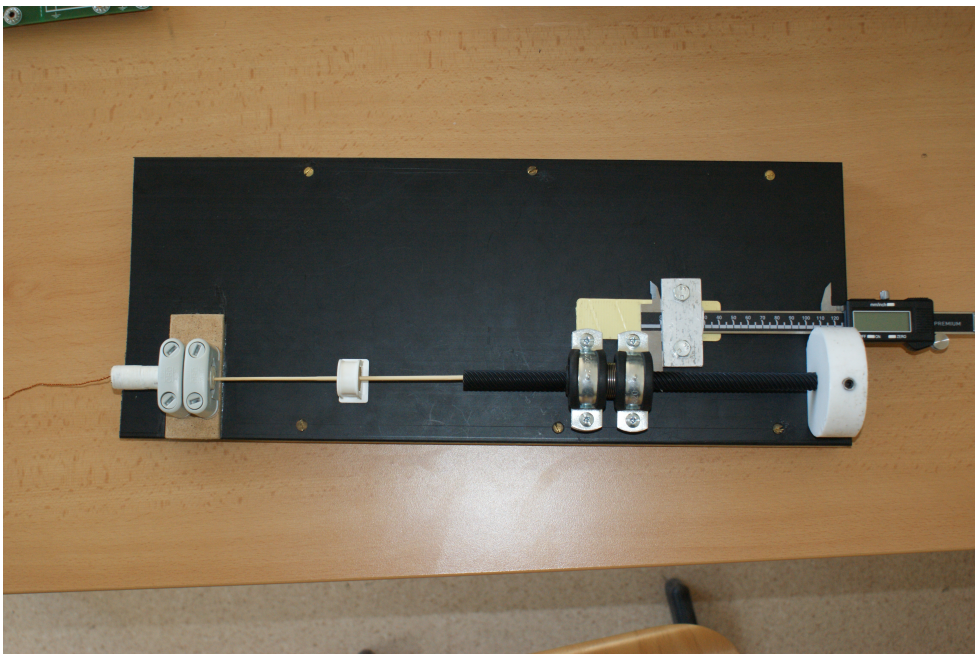
Obrázek 4.5.: Inicializace displeje[7]

4.5. Převodník UART - USB

Na desce je implementován čip FT230x od firmy FTDI, který převádí signály mezi sběrnicí RS232, RS422, nebo RS485 a univerzálním sériovým rozhraním USB. Umožní tedy komunikaci s PC přes virtuální sériový port, případně komunikaci s některou z průmyslových sběrnic. Dále je nezbytný pro programování čipu bootloaderem. Jeho velká výhoda je malá velikost a také že obsahuje vnitřní oscilátor.

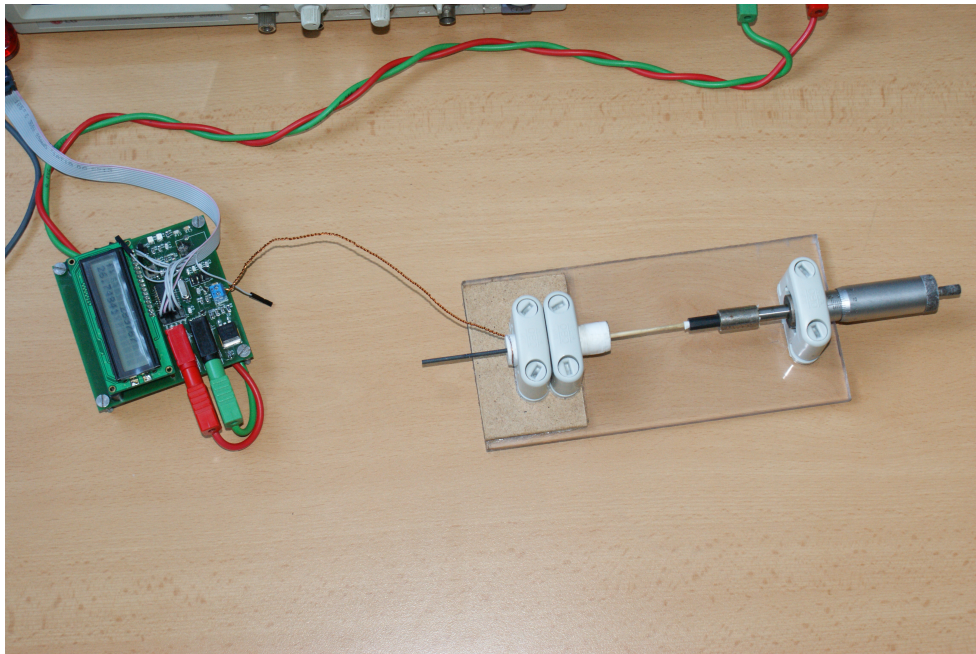
MĚŘENÍ SENZORU**5.1. Převodní charakteristiky**

Pro vytvoření převodní charakteristiky potřebujeme změřit závislost frekvence LC oscilátoru na vzdálenosti, o kterou je jádro posunuto v měřicí cívce. K tomuto účelu jsem zkonstruoval dvě měřicí zařízení. První z nich používá digitální posuvné měřítko a je na obrázku 5.1. Jeho výhodou je měření větších úseků vzdálenosti, ovšem je velmi složité nastavit konstantní a malá posunutí jádra. Přesnost posuvného měřítka je 0,01 mm.



Obrázek 5.1.: Měřicí deska s posuvným měřítkem

Problémy větší desky řeší menší měřicí destička, která je vybavena klasickým mechanickým mikrometrem. Nastavení posuvu je velmi jemné s přesností na 0,01 mm. Problém této desky je nedostačující rozsah posunutí jádra, a proto není možnost proměřit kompletní závislost frekvence na vzdálenosti. Šrouby s mikrometrickým závitem se vyrábějí v normované délce 25 mm a šrouby s delšími závity jsou ojedinělé a velmi drahé.

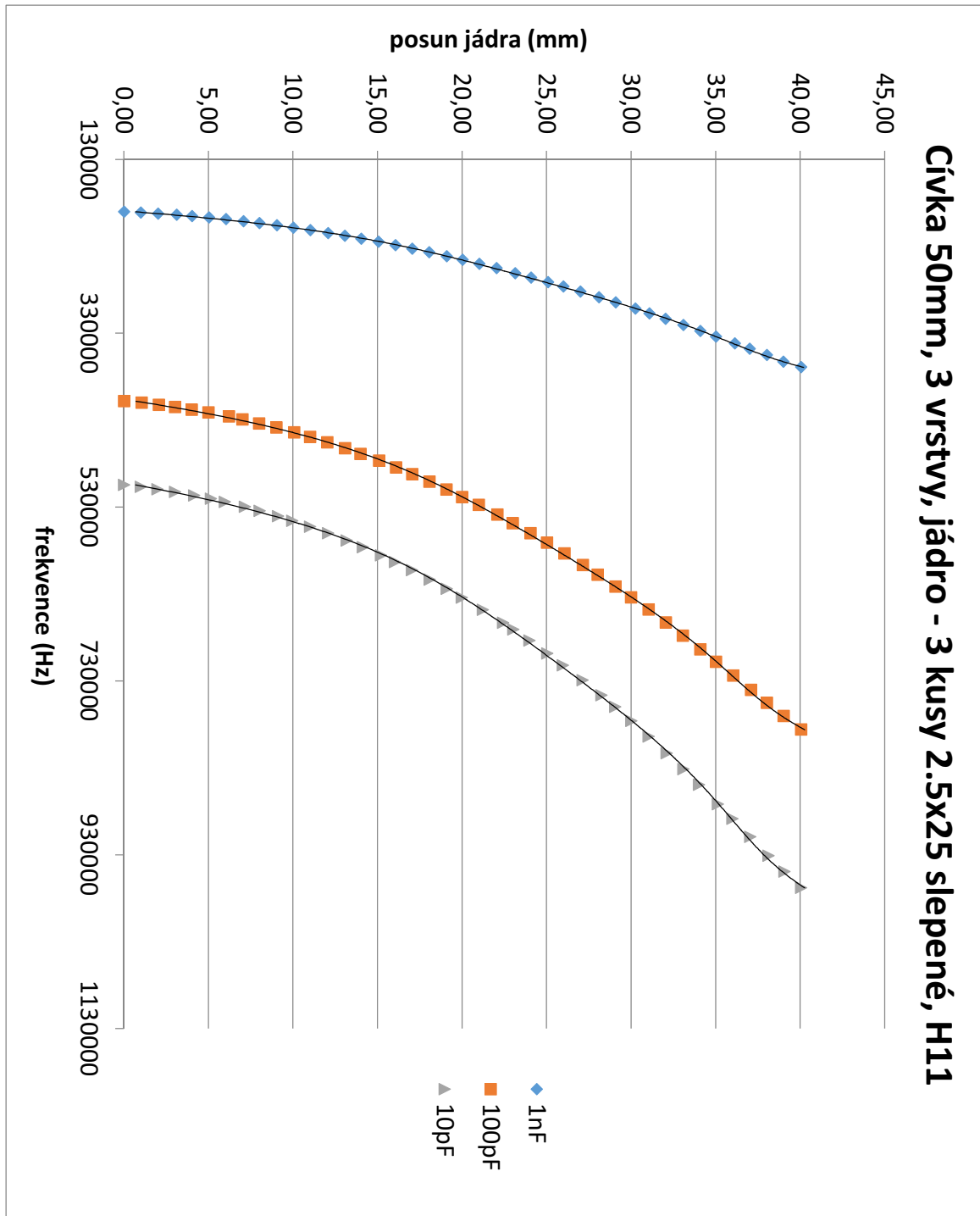


Obrázek 5.2.: Měřicí destička s mikrometrem

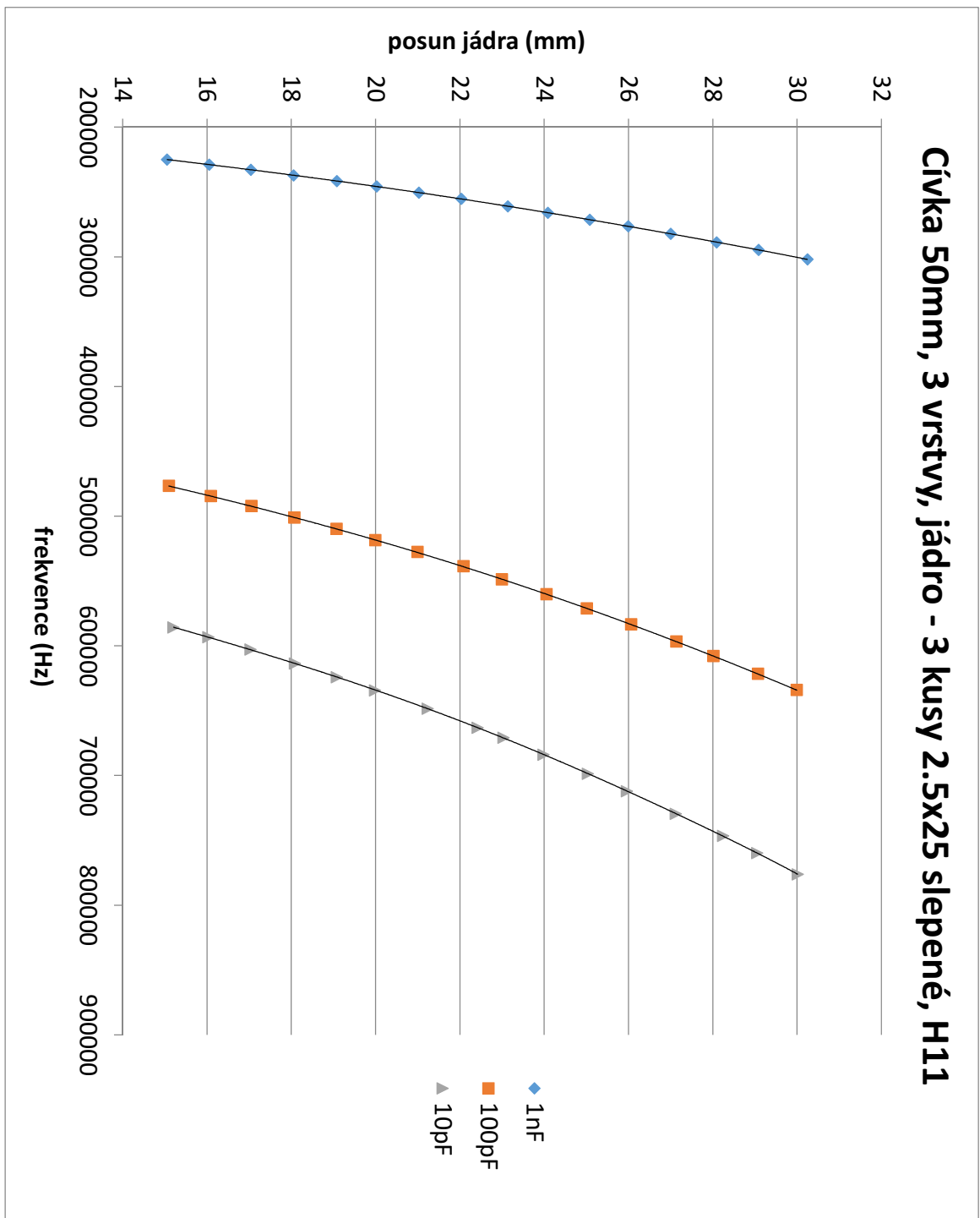
Výsledná měření byla prováděna za použití obou desek. Celá závislost frekvence na posuvu jádra byla změřena deskou s posuvným měřítkem. Závislost poté byla aproximována metodou nejmenších čtverců, která je popsána v sekci 4.3, tím jsme získali převodní charakteristiku. Charakteristiky jsou nelineární, ovšem okolo středu se blíží lineární charakteristice, tedy jejich aproximace je zde přesnější. Na obrázku 5.3 jsou celé závislosti frekvence na vzdálenosti pro definovanou cívku s jádrem a tři hodnoty kondenzátorů. Na následujícím grafu 5.4 je vidět téměř lineární závislost převodních charakteristik při malých posuvech jádra. Dále je dobré si všimnout rozdílů závislostí při různých frekvencích. Na nižších frekvencích jsou závislosti lineární ve větším rozsahu, ovšem za cenu menší citlivosti.

Nyní je potřeba ověřit přesnost aproximace výše uvedenou metodou, k tomu byla použita měřicí destička s mikrometrem. Posuv jádra byl měřen v rozsahu jednoho milimetru ve vybraném aproximovaném úseku převodní charakteristiky. Hodnoty mikrometru byly využity pro vytvoření referenční závislosti a pro grafické porovnání s hodnotami naměřenými senzorem. Vzhle-

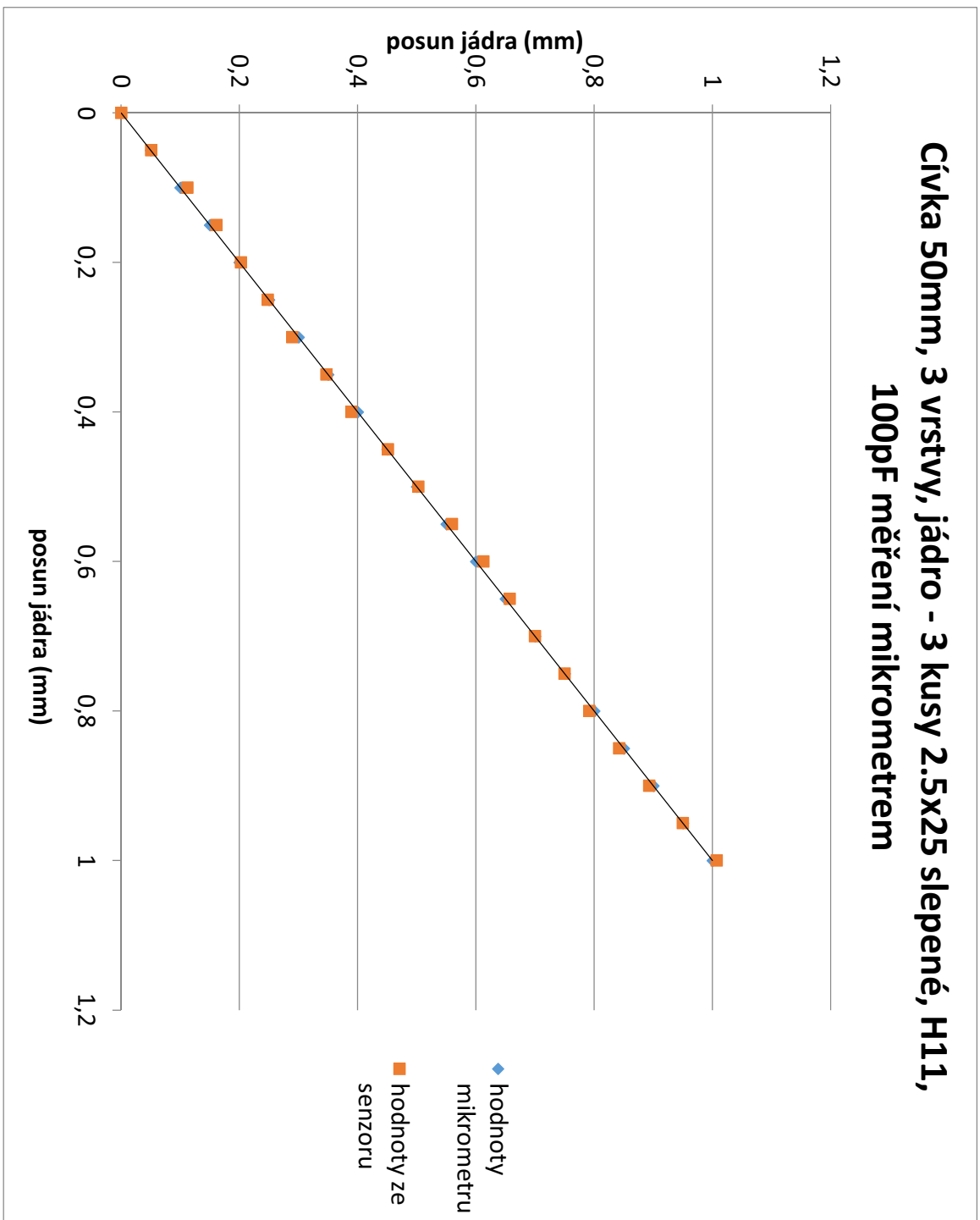
dem k nejistotě mikrometru nejsme schopni určit konečnou přesnost senzoru, musíme se v tomto případě spokojit s přesností odpovídající mikrometru. Naměřené hodnoty jsou na obrázku 5.5. Nutno podotknout, že pro tuto kombinaci indukčnosti a kapacity byla převodní charakteristika nejuvěrnější referenci, tedy mikrometru.



Obrázek 5.3.: Závislost frekvence větší cívky na posuvu jádra



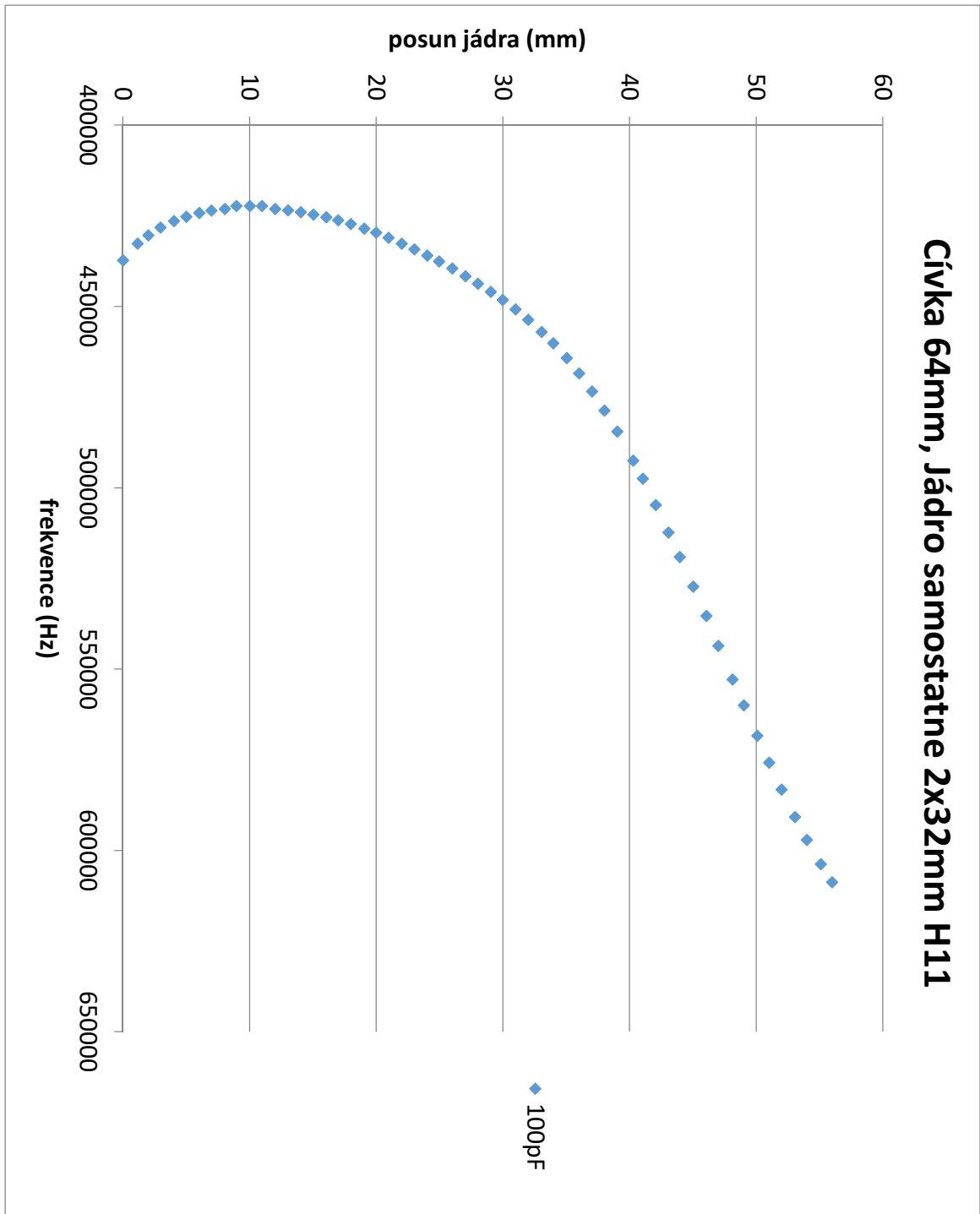
Obrázek 5.4.: Úzký interval závislosti frekvence na posuvu z obr. 5.3



Obrázek 5.5.: Reálné hodnoty naměřené senzorem v porovnání s hodnotami mikrometru

kratší cívka 50mm, 3 vrstvy, C 100pF		
jádro mat. H11, 3kusy 2.5x25 slepené		
vzdálenost (mm)	vzdálenost ze senzoru (mm)	absolutní chyba(mm)
0	0	0
0,05	0,05	0
0,1	0,112	-0,012
0,15	0,161	-0,011
0,2	0,203	-0,003
0,25	0,248	0,002
0,3	0,289	0,011
0,35	0,347	0,003
0,4	0,389	0,011
0,45	0,451	-0,001
0,5	0,502	-0,002
0,55	0,559	-0,009
0,6	0,613	-0,013
0,65	0,657	-0,007
0,7	0,7	0
0,75	0,75	0
0,8	0,792	0,008
0,85	0,842	0,008
0,9	0,893	0,007
0,95	0,95	0
1	1,007	-0,007

Velmi špatné vlastnosti měl senzor s malým jádrem. Jeho charakteristika byla silně nelineární, a proto byl změřen pouze jeden průběh. Zbytek průběhů, které se tolik neliší, se nachází v příloze.



Obrázek 5.6.: Nelineární závislost krátkého jádra

ZÁVĚR

Cíl práce byl navrhnout indukčnostíní senzor polohy, sestrojít ho, dosáhnout co největší přesnosti a měřicího rozsahu. Z naměřených hodnot, které vycházejí z aproximovaných převodních charakteristik lze usoudit, že přesnost se při započítání nejistot pohybuje okolo desítek mikrometrů. K dosažení větší přesnosti při měření charakteristik by bylo vhodné použít například krokový motor, pro přesné a konstantní intervaly posouvání jádra v měřicí cívce. Z naměřených výsledků dále vyplývá, že čím delší je měřicí cívka, tím větší je rozsah senzoru. Nevýhody senzoru jsou jeho špatné dynamické vlastnosti, které se sice dají zlepšit změnou nastavení programu, avšak za cenu snížení přesnosti senzoru.

Měření je výrazně ovlivněno feromagnetickými materiály v okolí měřicí cívky, které mají vliv na její rozptylové magnetické pole, a tedy i na výslednou indukčnost. Tato chyba je však aditivní a jako jedno z řešení tohoto problému přichází v úvahu kompenzace. Další možností by bylo kvalitní stínění senzoru.

Jako velmi nevhodné se ukázalo použití krátkých jader. S krátkým jádrem byla převodní charakteristika senzoru silně nelineární, a proto nebyly kratší jádra zvažována pro další měření.

Senzor byl měřen v takovém prostředí, aby rušivé vlivy vyskytující se v běžné praxi, byly co nejmenší. Jeho praktické využití tedy v momentální konfiguraci není doporučeno. Nejvíce prostoru pro zlepšení skýtá mechanická konstrukce senzoru. Feritová jádra mají sice vysokou permeabilitu a díky tomu je dosaženo velké citlivosti, ale jsou zároveň velmi křehká, což znemožňuje použít senzor v náročnějších podmínkách. Možnost by byla uložit jádro do pevného pouzdra, které by zabránilo jeho poškození.

Osobně si myslím, že by senzor určitě našel nějaké využití, ovšem byla by potřeba ošetřit nedostatky, které jsem nastínil výše.

LITERATURA

- [1] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. Praha: BEN, 1999. ISBN 80-860-5649-X.
- [2] Foit, Julius. *LC oscillator has stable amplitude*. EDN magazine. říjen 2005. Dostupné z [www](http://www.edn.com/design/analog/4323726/LC-oscillator-has-stable-amplitude):
<http://www.edn.com/design/analog/4323726/LC-oscillator-has-stable-amplitude>
- [3] *FT230X USB to basic UART IC Datasheet* [online]. Future Technology Devices International Ltd. 2013. Dostupný z [www](http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT230X.html):
<http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT230X.html>
- [4] GONZALEZ, Guillermo. *Foundations of oscillator circuit design*. Boston: Artech House, 2007, Artech House microwave library. ISBN 9781596931633.
- [5] *GDM1602A Datasheet* [online]. Xiamen Ocular. dostupný z [www](http://elmicro.com/files/lcd/gdm1602a_datasheet.pdf):
http://elmicro.com/files/lcd/gdm1602a_datasheet.pdf
- [6] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2005, ISBN 80-010-2731-7.
- [7] *HD44780 Datasheet* [online]. Hitachi. Dostupný z [www](https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf):
<https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>
- [8] ČERVENKA, Milan. Herodes: univerzální nástroj pro kreslení grafů. [online]. Katedry fyziky FEL ČVUT Dostupné z: <http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/grafy-new/grafy.php>
- [9] HUSÁK, Miroslav. *Senzory v elektronice a informatice*. Materiály k přednáškám předmětu Senzory v elektronice a informatice (A2B34SEI) 2012/2013, letní semestr, FEL ČVUT

-
- [10] *LM337 Negative Voltage Regulator Datasheet* [online]. ON Semiconductor. duben, 2012 dostupný z [www](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/LM337-D.PDF):
http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/LM337-D.PDF
- [11] ČERVENKA, Michal. *Zpracování fyzikálních měření, studijní text pro fyzikální praktikum*. [online] Praha. leden 2013. Dostupne z [www:http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/downloads/navody/zpracdat.pdf](http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/downloads/navody/zpracdat.pdf)
- [12] MITZNER, Kraig. *Complete PCB design using OrCAD capture and PCB editor*. Amsterdam: Newnes, 2009. ISBN 978-0-7506-8971-7.
- [13] *PIC18f25k22 Datasheet* [online]. Microchip. 2010. Dostupný z [www](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41412F.pdf):
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41412F.pdf>
- [14] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: BEN, 1996. ISBN 80-901-9843-0.
- [15] RIPKA Pavel, Stanislav ĎAĎO, Marcel KREIDL a Jiří NOVÁK. *Senzory a převodníky*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2005.
- [16] WILSON, Jon S. *Sensor Technology Handbook*. Burlington: Elsevier, 2004. ISBN 978-008-0480-848.

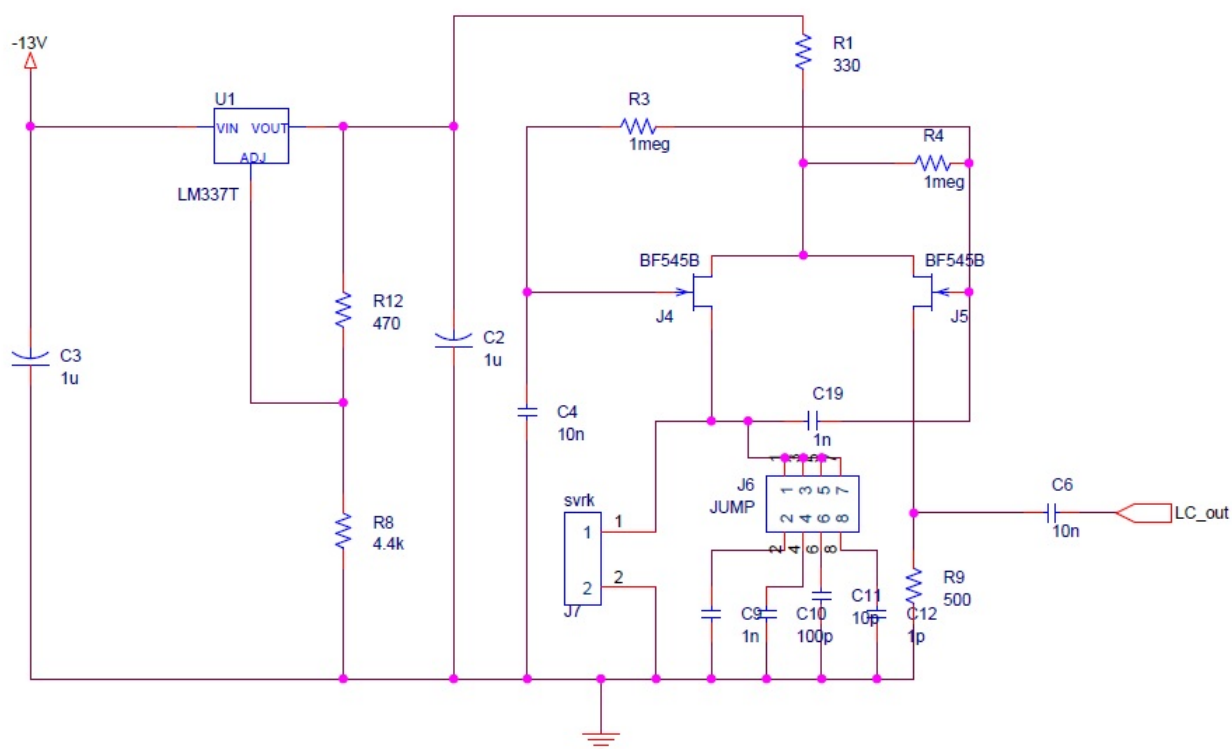
Přílohy

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

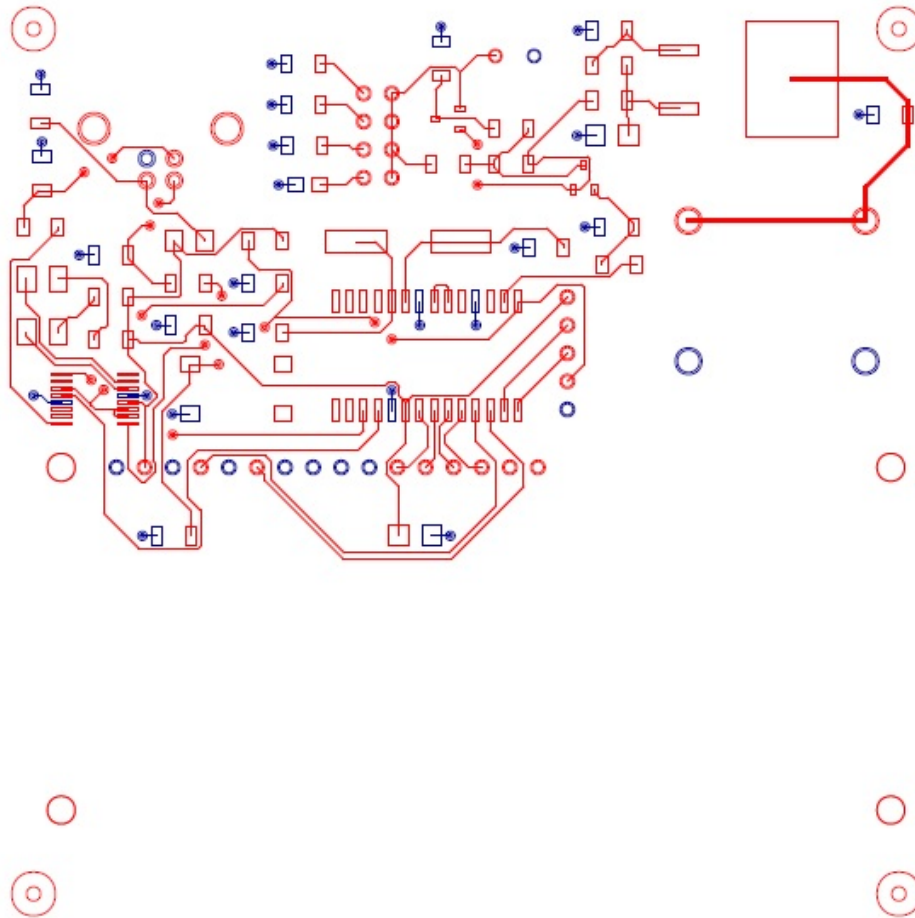
v_o		Výstupní napětí zesilovače
A_O		Napěťové zesílení oscilátoru
$A_v(j\omega)$		Napěťový zisk zesilovače (zisk otevřené smyčky)
$A_{vf}(j\omega)$		Zisk uzavřené smyčky
$\beta(j\omega)$		Přenosová funkce zpětnovazebního systému
C	F	Kapacita
CGRAM		Character Generator Random Access Memory
CGROM		Character Generator Read Only Memory
DDRAM		Display Data Random Access Memory
f_{ins}	Hz	Frekvence instrukcí mikrokontroleru
f_0		Frekvence LC oscilátoru
f_{osc}		Frekvence oscilátoru mikrokontroleru
I_D	A	Proud drainu
I_{OUT}		Výstupní proud oscilátoru
L	H	Indukčnost
LVDT		Linear Variable Differential Transformer
N	-	Počet závitů
PC		Osobní počítač
Q	-	Činitel jakosti cívky
R	Ω	Elektrický odpor
R_D	Ω	Dynamický odpor LC obvodu
R_m	H^{-1}	Magnetický odpor
RS-232		Sériové rozhraní
RS-485		Standard sériové komunikace
T_{ins}	s	Doba trvání jedné instrukce

v_o		Výstupní napětí zesilovače
$TMR0$	-	Počet pulzů načítaných timerem0
U_{DS}	V	Napětí drain-source
U_{GS}		Napětí gate-source
USB		Univerzální sériová sběrnice
UART		Univerzální asynchronní přijímač/vysílač
v_d	V	Součet vstupní a zpětnovazebního napětí
v_f		Napětí zpětné vazby
v_i		Vstupní napětí zesilovače
V_{IN+}		Kladný vstup komparátoru
V_{IN-}		Záporný vstup komparátoru
Z	Ω	Impedance
Z_m	H^{-1}	Komplexní magnetická reluktance
ω	s^{-1}	Úhlová frekvence
δ	-	Hloubka vniku
μ_0	-	Permeabilita vakua
μ_r	-	Relativní permeabilita

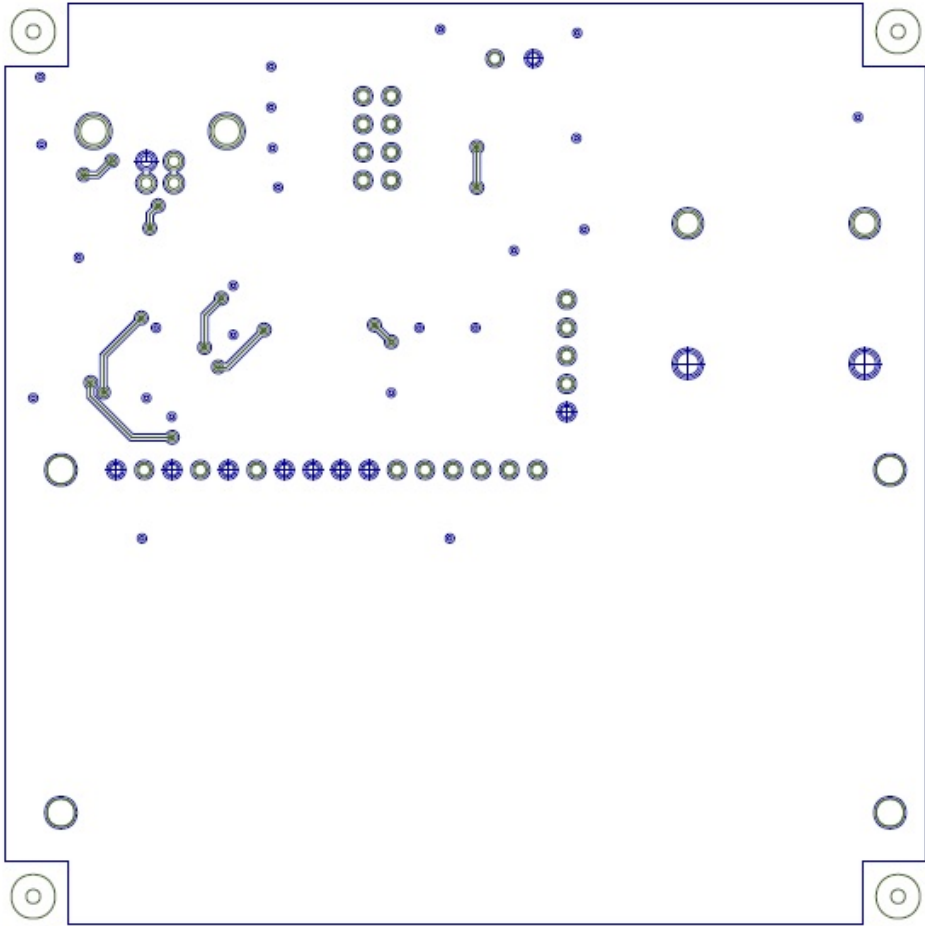
DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ

B.1. Blok oscilátoru

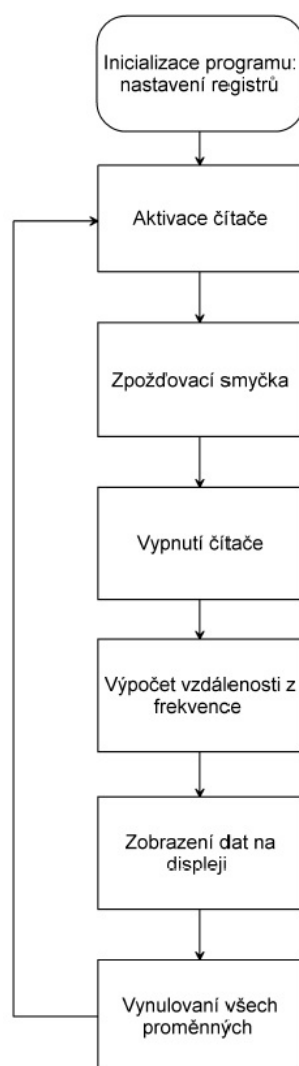
B.3. Vrstva TOP



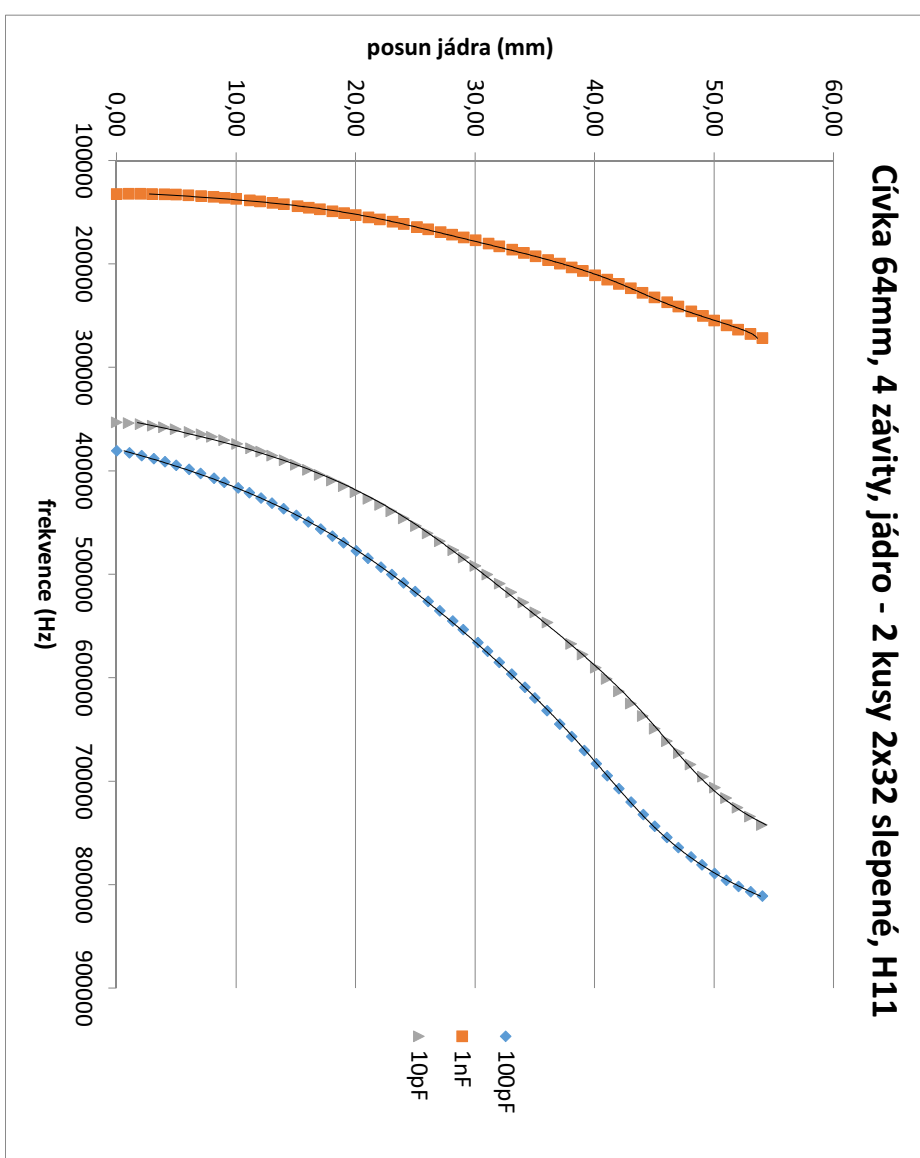
B.4. Vrstva BOT



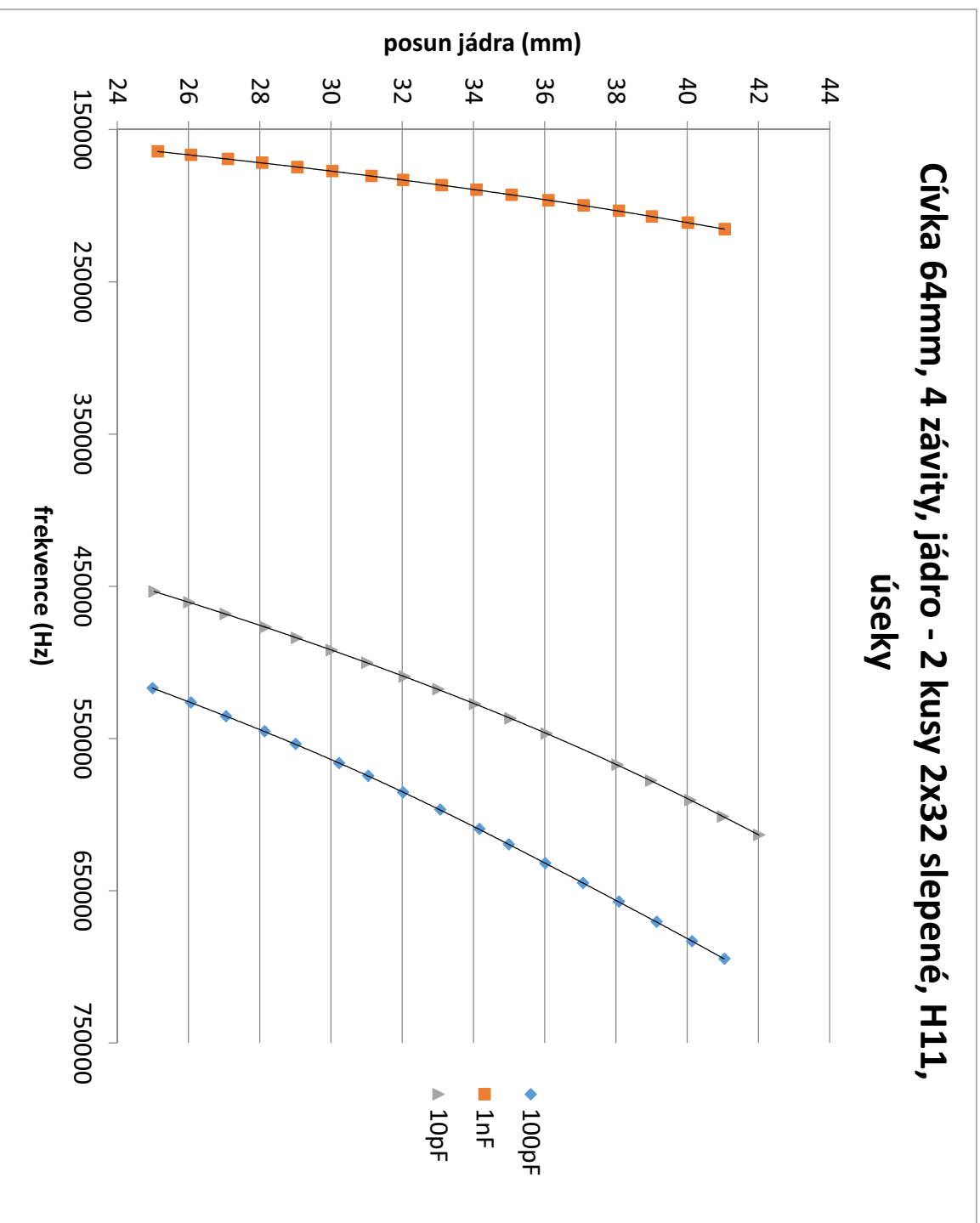
ZJEDNODUŠENÝ VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROGRAMU



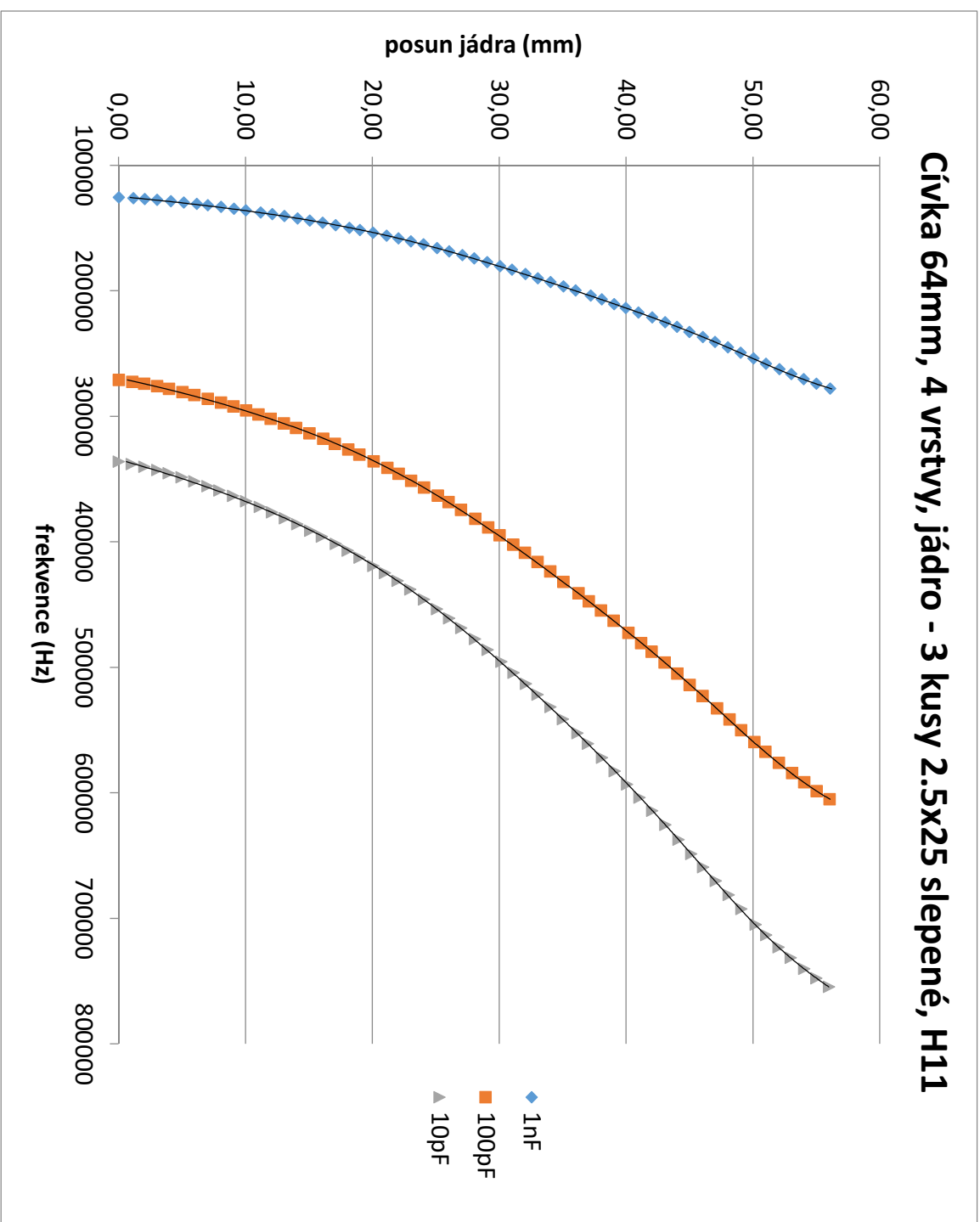
NAMĚŘENÁ DATA



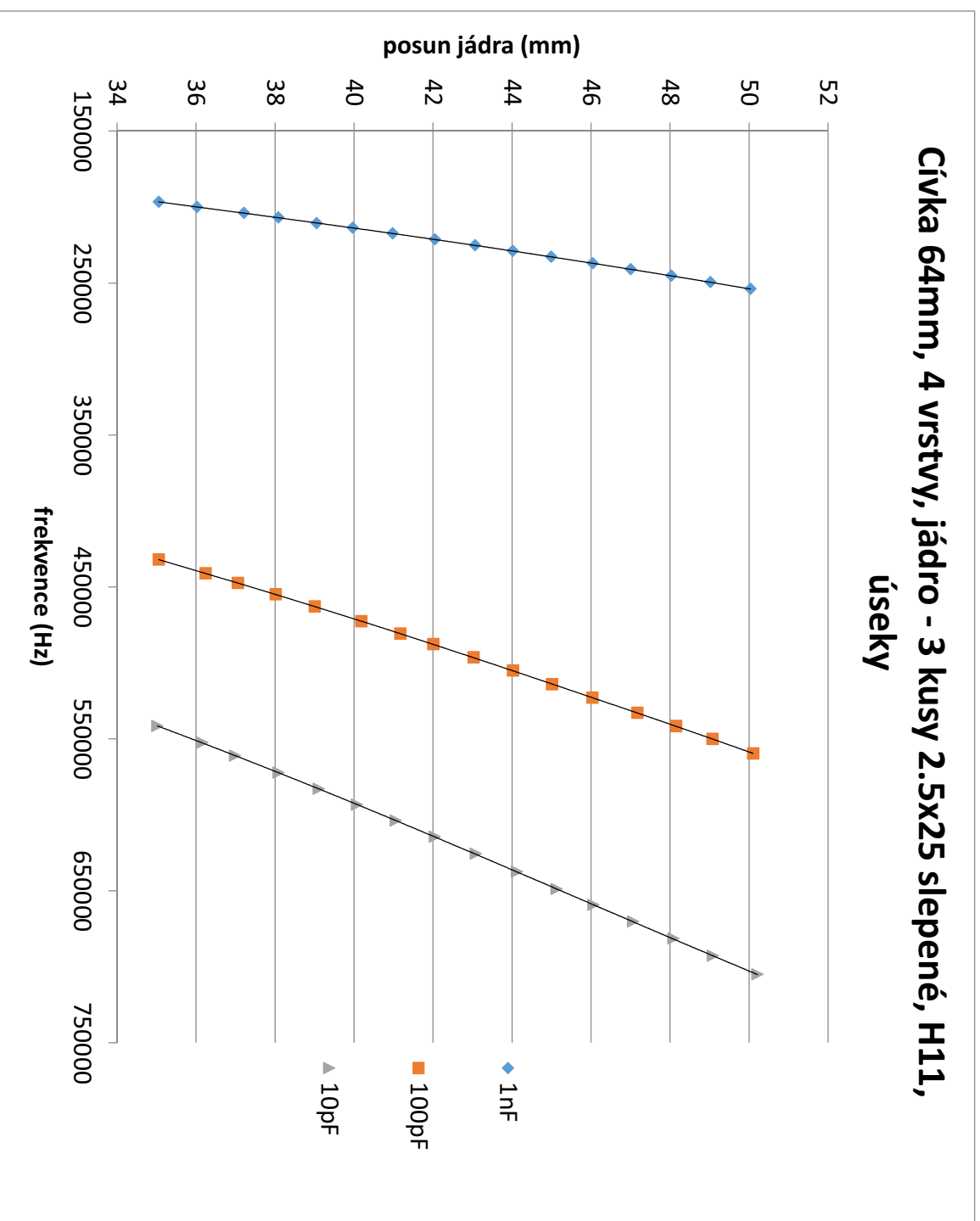
Cívka 64mm, 4 závitů, jádro - 2 kusy 2x32 slepené, H11, úseky



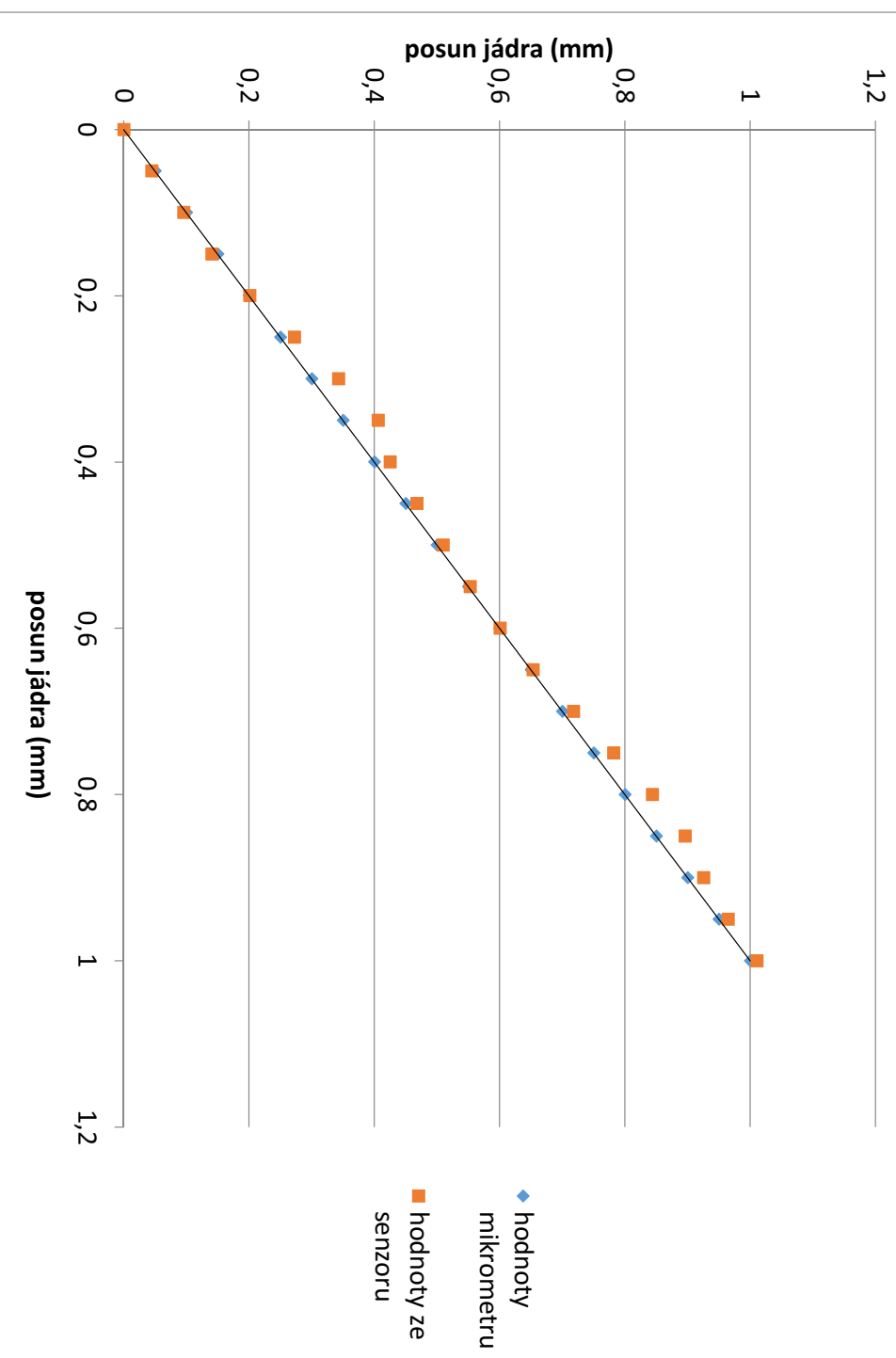
Cívka 64mm, 4 vrstvy, jádro - 3 kusy 2.5x25 splepené, H11



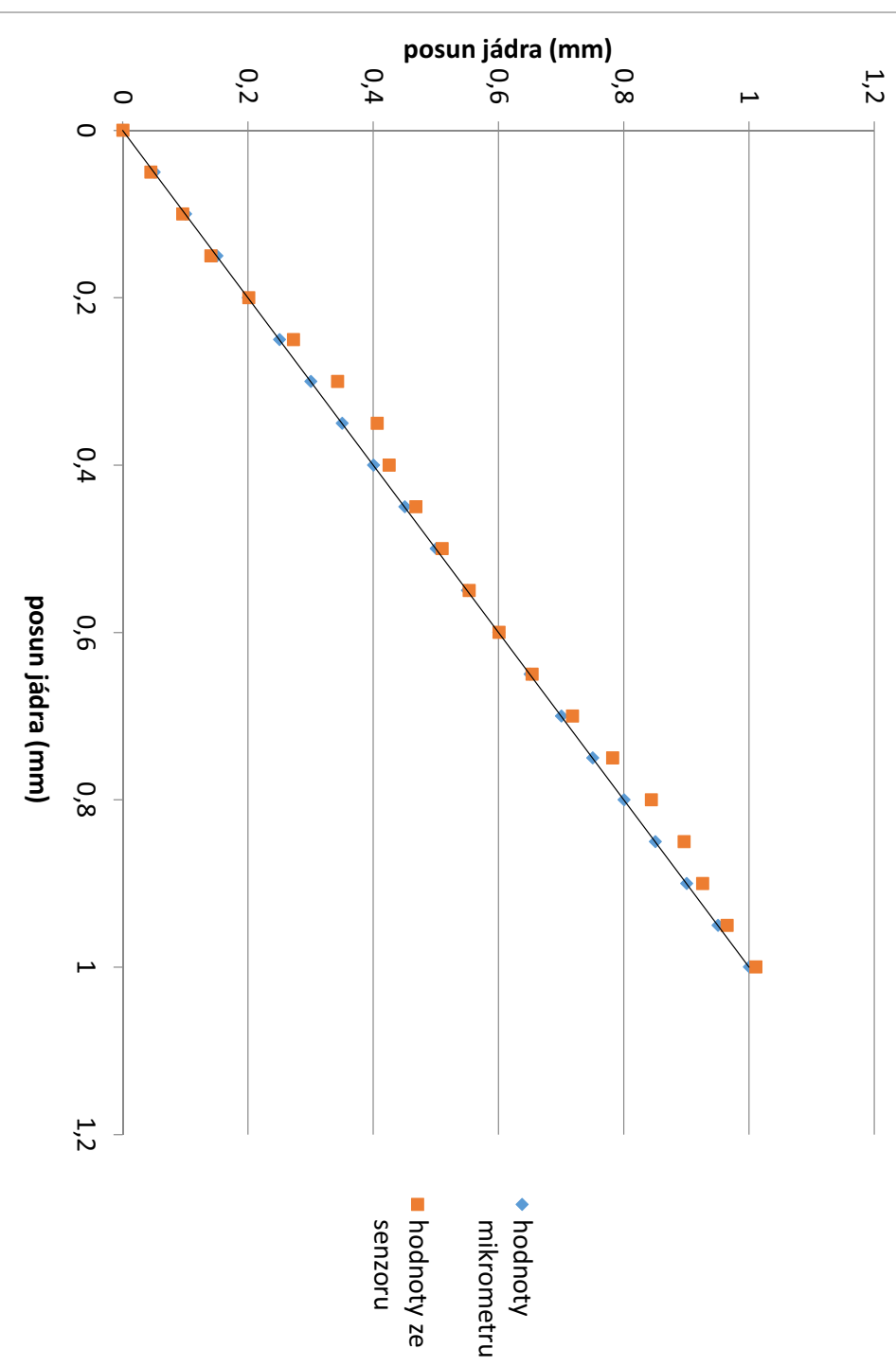
Cívka 64mm, 4 vrstvy, jádro - 3 kusy 2.5x25 splepené, H11, úseky



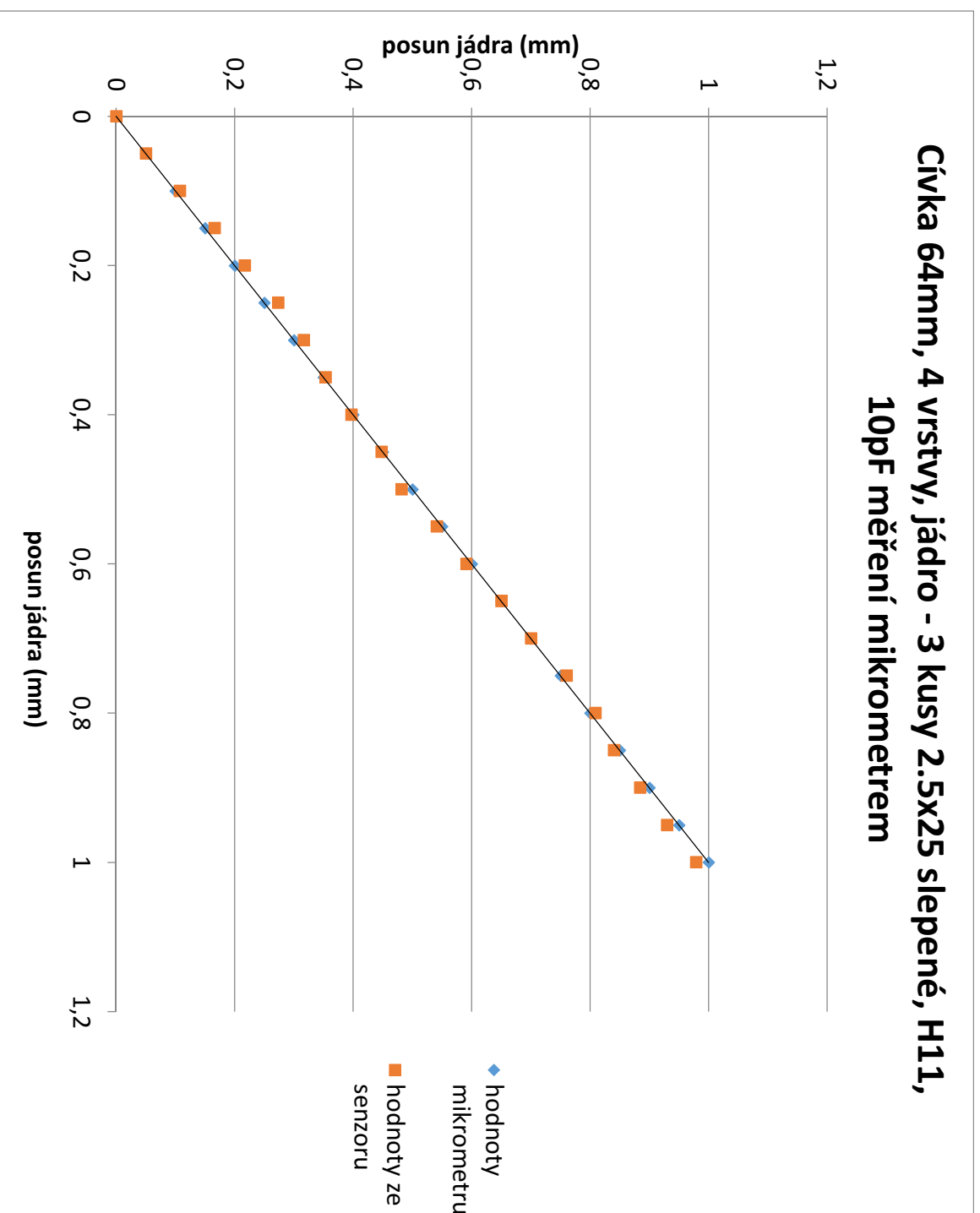
Cívka 50mm, 3 vrstvy, jádro - 3 kusy 2.5x25 slepené, H11, 1nF, měření mikrometrem



Cívka 64mm, 4 vrstvy, jádro - 3 kusy 2.5x25 slepené, H11, 100pF měření mikrometrem



Cívka 64mm, 4 vrstvy, jádro - 3 kusy 2.5x25 splepené, H11, 10pF měření mikrometrem



MĚŘICÍ PŘÍPRAVEK

