



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## SENZOR PRO NÍZKORYCHLOSTNÍ SNÍMÁNÍ POHYBU KONTINUA

SENSOR FOR LOW-SPEED CONTINUOUS MOTION SENSING

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Petr Tomášek**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.**

**BRNO 2019**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Bc. Petr Tomášek

**ID:** 154896

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### **Senzor pro nízkorychlostní snímání pohybu kontinua**

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte podklady pro návrh nízkourovňových měření, selektujte principy a metody vhodné pro aplikaci měření velmi malých rychlostí pohybu kapaliny z rozsahu  $v=0.01-1.0$  mm/s, věnujte pozornost eliminačním přístupům vybraných vnějších parametrů (změna teploty, tlaku, vlhkosti, stárnutí komponentů senzoru, atp.). Výsledky systematizujte a popište. Navrhněte senzor z oblasti nedestruktivních měřících metod. Laboratorně princip ověřte.

Navrhněte a realizujte funkční vzorek nedestruktivního typu senzoru pro měření průtoku kapaliny ve vzdálenosti od senzoru od 1-5mm s rychlosti proudění  $v=0.01-1.0$  mm/s. Navrhněte pracoviště pro provedení testů kontroly průtoku kapaliny. Proveďte měření a zhodnoťte výsledky, proveďte rozbor dosažených měření a očekávaných výsledků.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FRIEDL, M.; MARCOŇ, P.; FIALA, P.; KUBÁSEK, R. Measurement of concentration and water flow. Progress In Electromagnetics, 2011, vol. 2011, no. 2011, p. 1153-1157. ISSN: 1559-9450.

[2] Low level measurements handbook - 7th edition [online]. 7. USA: Keithley, Tektronix Company, 2016 [cit. 2018-05-16]. ISBN -. Dostupné z: <https://www.tek.com/document/handbook/low-level-measurements-handbook>

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 16.5.2019

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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**

Diplomová práce pojednává o problematice měření průtoků kapalin o velmi malých rychlostech. Práce je členěna do 4 kapitol. První kapitola se zabývá obecnými vlastnostmi kapalin, problematikou průtokoměrů, podrobně je rozebrán princip indukčního průtokoměru, na jehož principu je zkonstruovaný senzor založen. Ve druhé kapitole je podrobně rozebrán postup návrhu jednotlivých komponent senzoru – budicí i snímací části. Ve třetí kapitole je shrnut postup při realizaci senzoru a samotné měření rychlosti průtoku. Čtvrtou kapitolou je pak závěr, kde jsou shrnuty a zhodnoceny dosažené výsledky této diplomové práce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

kapalina, nedestruktivní, senzor, průtok, transimpedance

## **ABSTRACT**

Diploma thesis analyses low-speed flow measurement. Thesis consist of 4 chapters. First chapter is about liquids and its attributes, flow meters, especially induction flow meter, which is very important for designed sensor. In second chapter is detailed process of designing sensor. Description of realization and measurement of flow is in the third chapter. Result summary is in conclusion.

## **KEYWORDS**

Liquid, non-destructive, sensor, flow, transimpedance

TOMÁŠEK, Petr. Senzor pro nízkorychlostní snímání pohybu kontinua. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118256>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Pavel Fiala.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Senzor pro nízkorychlostní snímání pohybu kontinua jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Pavlu Fialovi, Ph.D., panu doc. Ing. Miloslavu Steinbauerovi, Ph.D. a panu Ing. Zdeňku Roubalovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky, trpělivost, a především ochotu při vzájemných konzultacích.

Petr Tomášek

# OBSAH

<b>Abstrakt</b>	<b>III</b>
<b>Klíčová slova</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Keywords</b>	<b>III</b>
<b>Prohlášení</b>	<b>V</b>
<b>Poděkování</b>	<b>V</b>
<b>Obsah</b>	<b>VI</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>VIII</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>XI</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teoretický úvod</b>	<b>2</b>
1.1    Základní pojmy a vlastnosti tekutin.....	2
1.1.1    Podobnostní čísla .....	2
1.1.2    Rovnice kontinuity.....	4
1.1.3    Bernoulliho rovnice .....	4
1.1.4    Druhy proudění tekutiny .....	5
1.1.5    Mezní vrstva tekutiny .....	6
1.1.6    Viskozita .....	6
1.2    Rozdělení průtokoměrů.....	7
1.3    Požadavky na průtokoměry .....	9
1.4    Indukční průtokoměr.....	10
1.4.1    Princip funkce .....	10
1.4.2    Náhradní obvod indukčního průtokoměru .....	12
1.4.3    Matematicko-fyzikální model indukčního průtokoměru .....	12
1.4.4    Faktory ovlivňující funkci průtokoměru .....	20
1.4.5    Vliv použitého potrubí .....	21
1.4.6    Zásady instalace průtokoměru .....	22
1.5    Měření nízkoúrovňových veličin .....	23

1.5.1	Metody měření nízkourovňových veličin .....	24
1.5.2	Přístroje vhodné pro měření nízkourovňových veličin a jejich vlastnosti 29	
1.6	Impedance .....	31
1.6.1	Impedance cívky .....	31
1.6.2	Rezonanční metody měření impedance .....	32
<b>2</b>	<b>Návrh senzoru</b>	<b>35</b>
2.1	Budicí část.....	37
2.1.1	Návrh budicí části senzoru.....	45
2.1.2	Návrh budicí cívky.....	47
2.1.3	Návrh rezonančního obvodu .....	51
2.2	Snímací část .....	53
2.2.1	Snímací deska .....	53
2.2.2	Zesilovač napětí a aktivní filtr .....	53
<b>3</b>	<b>Realizace a ověření funkčnosti senzoru</b>	<b>59</b>
3.1	Realizace budicího obvodu .....	59
3.2	Realizace snímací desky .....	61
3.3	Realizace obvodu operačního zesilovače .....	61
3.4	Realizace obvodu aktivního filtru .....	63
3.5	Měření průtoku .....	65
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>70</b>
	<b>Literatura</b>	<b>71</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>73</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Princip Bernoulliho rovnice [1].....	5
Obr. 2: Rychlostní profily proudění [1].....	5
Obr. 3: Princip vzniku mezní vrstvy [1].....	6
Obr. 4: Vysvětlení jevu viskozity [1].....	7
Obr. 5: Rozdělení průtokoměrů [1].....	8
Obr. 6: Princip indukčního průtokoměru [5].....	10
Obr. 7: Efekty vlivu kapaliny na měřenou veličinu průtokoměru - Lorentzův zákon [1] .....	11
Obr. 8: Náhradní schéma indukčního průtokoměru [1].....	12
Obr. 9: a) Průběhy magnetické indukce podél osy elektrod, b) Pokles indukce na krajích budících cívek [1].....	21
Obr. 10: Zásady instalace indukčního průtokoměru [3].....	22
Obr. 11: Teoretické limity měření napětí [14].....	23
Obr. 12: Porovnání typických rozlišovacích hodnot jednotlivých přístrojů [14].....	23
Obr. 13: Vliv rušivých napětí na přesnost měření [14].....	24
Obr. 14: Vlivy způsobené termoelektrickými napětími [14].....	25
Obr. 15: Schéma teplotního vyrovnání termoelektrických napětí [14].....	26
Obr. 16: Příkladné uspořádání stínění pro minimalizaci vlivů EMI a RFI [14].....	26
Obr. 17: Indukce nežádoucích elektrických napětí [14].....	27
Obr. 18: Příklad minimalizace indukovaných rušivých napětí [14].....	28
Obr. 19: Vznik rušivého elektrického napětí na vytvořené zemní smyčce [14].....	28
Obr. 20: Náhradní schéma a) kondenzátoru b) cívky.....	31
Obr. 21: Měření impedance rezonanční metodou.....	32
Obr. 22: Měření impedance pomocí Q-metru.....	33
Obr. 23: Náhradní obvod cívky pro vyšší frekvence $f$ pracovního režimu.....	33
Obr. 24: Blokové schéma senzoru průtoku kapaliny.....	35
Obr. 25: Frekvenční závislost modulu a fáze impedance $Z$ obecného SRO.....	36
Obr. 26: Příklad vinutí zkušební cívky.....	37
Obr. 27: Analyzovaná zkušební cívka, magnetický obvod senzoru.....	37
Obr. 28: Schéma měřicího pracoviště - určení Al konstanty magnetického materiálu jádra .....	38
Obr. 29: Frekvenční závislost indukčnosti magnetického obvodu senzoru.....	39



Obr. 30: Frekvenční závislost Al konstanty navrhovaného magnetického obvodu průtokoměru.....	40
Obr. 31: Schéma a) počítačového modelu, b) schéma obvodového modelu.....	41
Obr. 32: Výsledek simulace proudu cívkou $I$ v závislosti na počtu závitů $N_{1,2}$ .....	43
Obr. 33: Výsledek simulace výkonu $P_{outc}$ uvolněného na cívkách senzoru v závislosti na počtu závitů $N_1, N_2$ .....	44
Obr. 34: Blokové schéma budicí části senzoru.....	45
Obr. 35: Náhradní schéma budicí části senzoru .....	46
Obr. 36: Princip funkce senzoru .....	46
Obr. 37: Siločáry magnetického pole v okolí budicí cívky analyzovaného numerického modelu .....	48
Obr. 38: Velikost měrného magnetického toku $B$ ve vzdálenosti 1 mm od cívky .....	49
Obr. 39: Velikost měrného magnetického toku $B$ ve vzdálenosti 5 mm od cívky .....	49
Obr. 40: Navinutá budicí cívka uvažovaného modelu průtokoměru .....	50
Obr. 41: Schéma rezonančního obvodu.....	51
Obr. 42: Frekvenční závislost sériového rezonančního obvodu – výsledek simulace....	52
Obr. 43: Blokové schéma zesilovače a filtru .....	53
Obr. 44: Blokové schéma vztažných elektrod a stínění.....	54
Obr. 45: Frekvenční a fázová charakteristika navrženého filtru.....	56
Obr. 46: Frekvenční charakteristika snímací části průtokoměru .....	57
Obr. 47: Fázová charakteristika snímací části průtokoměru.....	58
Obr. 48: Sestavená experimentální část budicího bloku senzoru průtokoměru .....	59
Obr. 49: Modulová frekvenční charakteristika budicího obvodu .....	60
Obr. 50: Fázová frekvenční charakteristika budicího obvodu .....	60
Obr. 51: Snímací deska navrženého průtokoměru.....	61
Obr. 52: Obvod operačního zesilovače.....	62
Obr. 53: Schéma měřicího pracoviště pro měření napěťového přenosu OZ .....	62
Obr. 54: Aktivní filtr pro navržený průtokoměr .....	63
Obr. 55: Modulová frekvenční charakteristika aktivního filtru.....	64
Obr. 56: Fázová frekvenční charakteristika aktivního filtru.....	64
Obr. 57: Schéma měřicího pracoviště.....	65
Obr. 58: Měřicí pracoviště testování navrženého funkčního vzorku průtokoměru .....	65
Obr. 59: Detail umístění senzoru na vzorek měřicího vedení.....	66
Obr. 60: Měřicí vedení, její napojení na přívod a regulaci rychlosti proudění kapaliny.66	
Obr. 61: Graf závislosti fázového posunu vstupního a výstupního signálu na rychlosti $v$	

průtoku kapaliny měřicím vedením. ....	68
Obrázek 62: Měření, uspořádání senzoru s distanční podložkou .....	69

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Srovnání typů průtokoměrů .....	9
Tab. 2: Obsah iontů v běžné pitné vodě.....	18
Tab. 3: Parametry feritového jádra .....	47
Tab. 4: Parametry jednotlivých prvků v obvodu .....	51
Tab. 5: Přehled základních parametrů OZ OPA 129 [16] .....	54
Tab. 6: Požadované parametry filtru.....	55
Tab. 7: Využití rádiového spektra.....	56
Tab. 8: Naměřené hodnoty fázového posunu v závislosti na rychlosti průtoku kapaliny .....	67

# ÚVOD

V současné době je ve společnosti hojně diskutována otázka sucha, tedy nedostatku vody, jak podzemní, tak povrchové. Česká republika se nachází na tzv. „střeše Evropy“, žádný velký tok sem vodu nepřivádí, a proto je stav vodního hospodářství závislý na srážkách, které na naše území spadnou. Tato problematika je velmi úzce spojena se stavem vegetace v přírodě. Vzhledem k tomu, že pocházím z Vysočiny, mám velmi blízký vztah k lesnictví, k němuž směřuje i cíl této diplomové práce.

Pod pojmem v zadání - nízkorychlostní pohyb kontinua - se totiž skrývá rozvod minerálních živin v xylému, tedy dřevním cévním svazku. Analýzou rychlosti tak lze zjistit „zdravotní stav“ stromu, případně zjistit přerušení vodního sloupce, a tedy laicky řečeno, že strom usychá, či případně již uschnul.

Cílem práce je tedy navrhnout a realizovat (včetně zkušebního pracoviště) senzor z oblasti nedestruktivních, který analyzuje rychlost průtoku roztoku vody a minerálních živin z kořenového systému. Senzor byl navržen na magneto-hydro-dynamickém základu, byly využity principy funkce indukčního průtokoměru.

# 1 TEORETICKÝ ÚVOD

V této kapitole jsou shrnuty teoretické poznatky, které se vážou na problematiku měření průtoku kapalin. Kapitola je rozdělena na několik oblastí, které postupně rozebírají problematiku kapalin, typů průtokoměrů (s podrobnějším zaměřením na indukční průtokoměry) a jejich srovnání podle parametrů měření rychlosti proudění a v závěru je naznačen koncept a princip měření nízkoúrovňových signálů, které souvisí s problematikou měření nízkorychlostního pohybu kontinua dle zadání ( $v = 0,1 - 1,0$  mm/s).

## 1.1 Základní pojmy a vlastnosti tekutin

Za tekutiny [7] jsou považovány látky kapalného a plynného skupenství. Tekutiny mají mnoho vlastností, některé z nich jsou rozhodující pro měření průtoku v závislosti na použitém typu průtokoměru [1]. Pro jednodušší pochopení principů funkce jednotlivých typů průtokoměrů [1] jsou tyto vlastnosti shrnuty v textu níže. Současně je vysvětleno několik základních pojmů, které by měly být, v souvislosti s problematikou průtokoměrů, známy anebo objasněny.

Mezi hlavní vlastnosti tekutin patří například ta, že nemá vlastní tvar, drží tedy tvar nádoby, ve které jsou drženy. Částice tekutin se vyznačují velkou pohyblivostí a rychlostí, jsou drženy elektrohydrodynamickými vazbami a tvoří tak kapalinu s definovanou hustotou a viskozitou. Střední rychlost částice je dána vztahem

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (1.1)$$

kde  $\Delta l$  představuje element dráhy [m],

$\Delta t$  představuje časový úsek [s].

Jako průtok se označuje podíl množství tekutiny, která protéká daným průtočným průřezem, a času, který je potřebný pro protečení tohoto daného množství. S tímto souvisí další pojmy uvedené níže.

### 1.1.1 Podobnostní čísla

K objasnění některých základních pojmů je nutné mít přehled o tzv. podobnostních číslech. Tato čísla jsou tvořena vztahy fyzikálních veličin, které jsou na sobě nezávislé, tzn., aby byla bezrozměrná.

#### Reynoldsovo číslo $Re$

Toto číslo [1] udává poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině a je jedno z kritérií pro určení typu proudění tekutiny.

Pro kruhové potrubí o průměru  $D$  je definováno vztahem

$$Re_D = \frac{\text{setrvačné síly}}{\text{třecí síly}}$$
$$Re_D = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu} \quad (1.2)$$

kde  $\eta$  představuje dynamickou viskozitu tekutiny [Pa.s],  
 $\nu$  představuje kinematickou viskozitu tekutiny [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>],  
 $\rho$  představuje hustotu tekutiny [kg.m<sup>-3</sup>].

Tzv. kritické Reynoldsovo číslo určuje hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním. Pro potrubí o průřezu kruhu se jako kritická hranice uvažuje  $Re_{krit}=2320$ . Pokud je hodnota  $Re < 2320$ , jedná se o laminární proudění, v opačném případě se kapalina dostává do stavu proudění turbulentního charakteru. V oblasti kolem  $Re=2320$  se nachází přechodová oblast, ve které není možné rozhodnout, o jaký typ proudění se jedná, vyskytují se v ní totiž oba druhy. Druhy proudění jsou konkrétněji popsány v dalším textu.

#### **Nusseltovo číslo Nu**

Toto podobnostní číslo [1] charakterizuje přenos tepla a je využíváno především u tepelných anemometrů a je definováno výrazem

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (1.3)$$

kde  $\alpha$  představuje koeficient přestupu tepla [W/m<sup>2</sup>K],  
 $d$  představuje průměr žhaveného drátku [m],  
 $\lambda$  představuje měrnou tepelnou vodivost [W/mK].

Ve vztahu s Reynoldsovým číslem je Nusseltovo číslo užíváno jako tzv. tepelná přenosová funkce.

#### **Machovo číslo Ma**

Slouží k určení poměru rychlosti proudění ku rychlosti zvuku [1], je definováno vztahem

$$Ma = \frac{c}{a}, \quad (1.4)$$

kde  $c$  představuje rychlost proudění [m/s],  
 $a$  představuje rychlost zvuku [m/s].

### Prandtovo číslo Pr

Prandtovo číslo [1] charakterizuje teplotní poměry při proudění. Je definováno vztahem

$$\begin{aligned}Pr &= \frac{v}{a}, \\Pr &= \frac{\eta \rho c_p}{\rho \lambda}, \\Pr &= \frac{\eta c_p}{\lambda},\end{aligned}\tag{1.5}$$

kde  $v$  představuje kinematickou viskozitu [ $\text{m}^2/\text{s}^{-1}$ ],

$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$  představuje teplotní vodivost [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

kde  $c_p$  představuje měrnou tepelnou kapacitu za konstantního tlaku [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],

$\eta$  představuje dynamickou viskozitu kapaliny [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ],

$\lambda$  představuje měrnou tepelnou vodivost [ $\text{W}/\text{mK}$ ].

### 1.1.2 Rovnice kontinuity

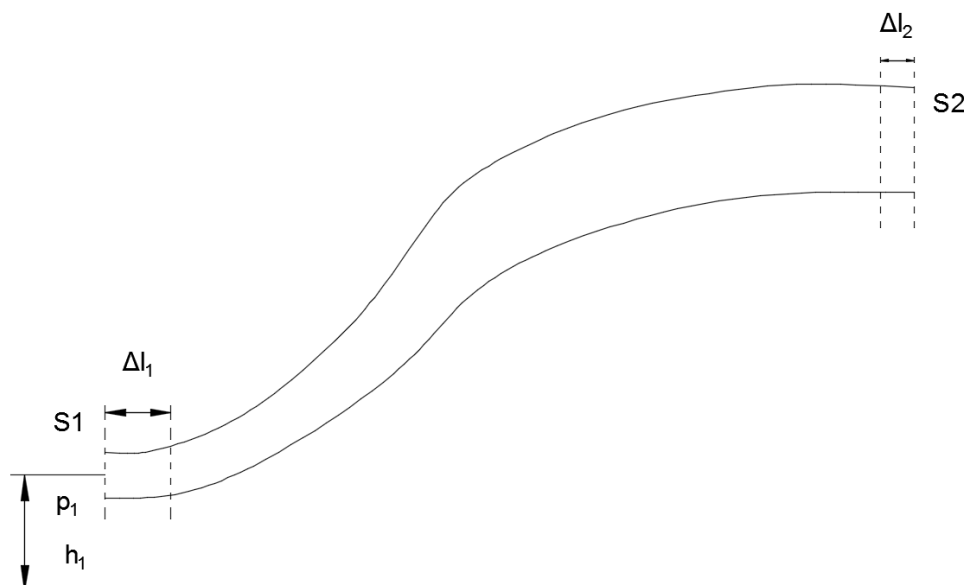
Hmotnost proudící tekutiny (nestlačitelné) [1] v rámci uzavřeného prostředí, mezi dvěma místy pozorování o ploše průřezu  $S_1$  a  $S_2$  a rychlostech proudění  $v_1$  a  $v_2$ , musí být zachována. Tento vztah se označuje jako rovnice kontinuity

$$\begin{aligned}\rho S_1 v_1 &= \rho S_2 v_2 \\S_1 v_1 &= S_2 v_2,\end{aligned}\tag{1.6}$$

kde  $\rho$  představuje hustotu tekutiny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

### 1.1.3 Bernoulliho rovnice

Zákon zachování mechanické [1] energie vyjadřuje v mechanice tekutin právě Bernoulliho rovnice, která je dána vztahem. Základním předpokladem její platnosti jsou vodorovná poloha sledovaného potrubí, nestlačitelnost tekutiny a rovnoměrné rozdělení rychlosti po průřezu potrubí (to ale závisí na mikrostruktuře povrchu potrubí). Princip odvození Bernoulliho rovnice je naznačen na obrázku Obr. 1.



Obr. 1: Princip Bernoulliho rovnice [1]

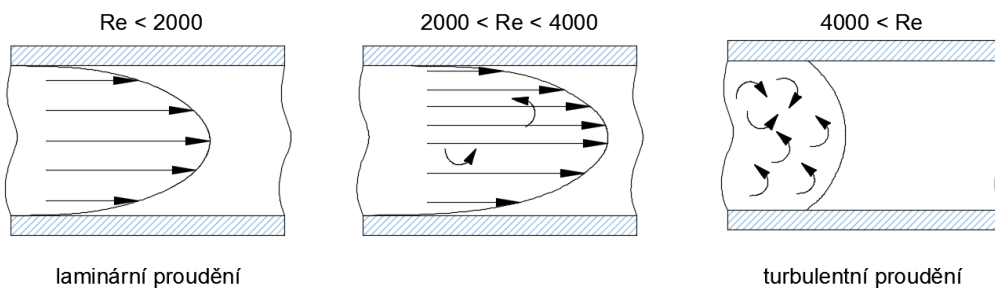
Odvození Bernoulliho rovnice (1.7) je analogické s odvozením rovnic pro zákon zachování mechanické energie

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = const, \quad (1.7)$$

- kde  $\rho$  představuje hustotu tekutiny [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  
 $p$  představuje tlak [Pa],  
 $g$  představuje tíhové zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  
 $v$  představuje rychlost pohybu tekutiny [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

### 1.1.4 Druhy proudění tekutiny

Proudění je zásadně ovlivněno na rozložení třecích a setrvačných sil v tekutině. Rozlišujeme dva druhy proudění, jak je zobrazeno na obrázku Obr. 2.



Obr. 2: Rychlostní profily proudění [1]

Při tzv. laminárním proudění se částice tekutiny pohybují po drahách, které se vzájemně nekříží, tedy ve vrstvách (latinsky lamina – destička). Rychlost proudění je závislá na poloze částice. Nejrychlejší proudění je v ose potrubí, nejmenší naopak u jeho



okrajů.

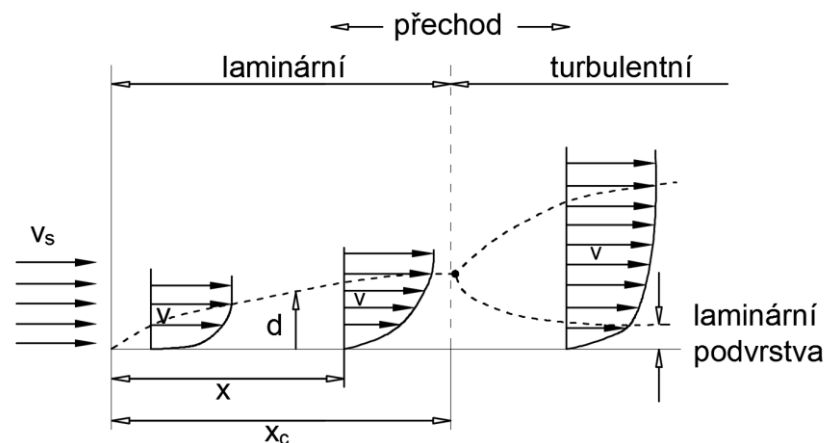
Při turbulentním proudění se dráhy jednotlivých částic navzájem kříží a ovlivňují. Dochází k tvorbě vírů a chaotického pohybu částic. Tyto aspekty poté negativně ovlivňují rychlost proudění. K vyšší rychlosti proudění je nutné zvýšit tlak. Částice proudí téměř stejnou rychlostí.

Jak již bylo zmíněno výše, o druhu proudění v daném potrubí informuje velikost Reynoldsova čísla.

### 1.1.5 Mezní vrstva tekutiny

Jedná se o vrstvu tekutiny [1], která se přímo dotýká povrchu obtékaného tělesa. Tato vrstva je výrazně ovlivněna především viskozitou, kvalitou a mikrostrukturou povrchu a je charakteristická především vysokými rozdíly v rychlostech proudění (od nulových hodnot v blízkosti stěn potrubí, po rychlost vnějšího proudění).

Funkce a přesnost mnohých typů průtokoměrů je touto vrstvou významně ovlivněna, jelikož části některých senzorů leží ve stěně potrubí, nebo její blízkosti. Těchto vlastností je využito např. u tzv. fluidikových průtokoměrů. Výrazně však také tato vrstva ovlivňuje funkci indukčních (vzhledem k uložení elektrod), ultrazvukových průtokoměrů (zde jsou ovlivněny piezoelektrické měniče) a turbínových průtokoměrů. Na obrázku Obr. 3 je naznačen vznik mezní vrstvy.



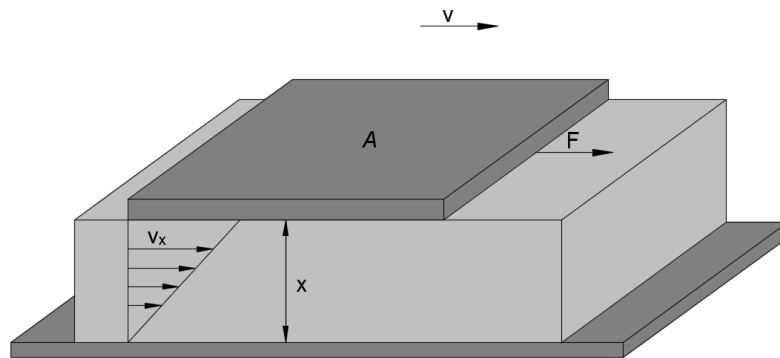
Obr. 3: Princip vzniku mezní vrstvy [1]

Z Obr. 3 je patrné, že u vtoku do potrubí se tloušťka mezní vrstvy limitně blíží k nule. S rostoucí vzdáleností  $x$  tloušťka mezní vrstvy roste a v daném bodě, tzv. kritické vzdálenosti  $x_c$ , dosáhne maxima. Tato kritická vzdálenost je přímo závislá drsnosti stěn potrubí (tzn. na materiálu, mikrostruktuře, ze kterého je potrubí vyrobeno) a na míře turbulencí v proudící tekutině.

### 1.1.6 Viskozita

Vznik smykového napětí [1] mezi dvěma sousedními vrstvami, které se pohybují rozdílnou rychlostí, je následek viskozity. Mezi molekulami v jednotlivých vrstvách proudící tekutiny působí elektrohydrodynamické vazební síly [11]. Při nuceném pohybu proto vznikají vnitřní síly nebo vnitřní tření. Tento jev má v makroskopickém měřítku za

následek vznik smykového napětí. Jednoduchý princip je naznačen na obrázku Obr. 4.



Obr. 4: Vysvětlení jevu viskozity [1]

Na obrázku Obr. 4 je znázorněné, že tekutina se pohybuje mezi pevnou stěnou a deskou A, která se pohybuje rychlostí  $v$  účinkem síly  $F$ . Rychlost  $v$  těsně blízkosti stěny nulová a směrem k desce roste (u desky již dosahuje rychlosti  $v$ ), proto podél tloušťky kapaliny vzniká gradient rychlosti  $dv/dx$ . Mezi jednotlivými vrstvami pak vzniká tzv. smykové napětí, které je dáno vztahem

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{F}{A}, \\ \tau &= \eta \frac{dv}{dx}, \end{aligned} \tag{1.8}$$

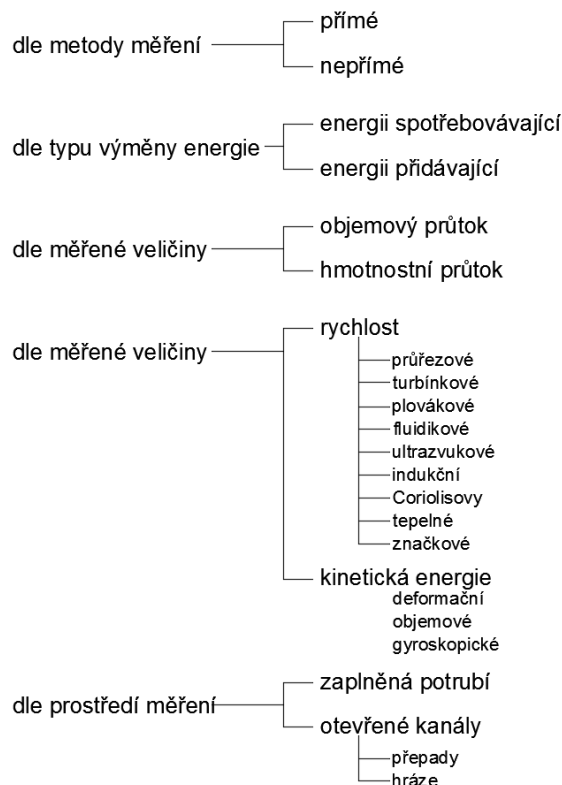
kde  $\eta$  představuje dynamickou viskozitu [ $\text{Ns}\cdot\text{m}^{-2}$ ].

Ze vztahu výše uvedeného je patrné, že smykové napětí je přímo úměrné gradientu rychlosti podél průřezu tekutiny.

## 1.2 Rozdělení průtokoměrů

Průtokoměry pro svoji funkci využívají nejrůznějších fyzikálních principů a vlastností kapalin. Zjednodušeně řečeno, jedná se o převodník průtoku na jinou fyzikální veličinu, která je lineárně závislá na velikosti průtoku. Základní rozdělení průtokoměrů [1] je naznačeno na obrázku Obr. 5.

## SENZORY PRŮTOKU



Obr. 5: Rozdělení průtokoměrů [1]

Jak je v obrázku Obr. 5 zřejmé, existuje několik hledisek pohledu na rozdělení průtokoměrů. V textu níže je přiblížen princip funkce jednotlivých typů.

Průtokoměry využívající přímé metody jsou např. dávkovací senzory, které tekutinu rozdělí na přesně definované díly a transportují ji ve směru proudění. Tato zařízení využívají střídavého plnění a vyprazdňování odměrných nádob, při kterém tento cyklus probíhá samočinně díky kinetické energii tekutiny. Dále jsou známy průtokoměry vážící hmotnost tekutiny v dané části vedení/potrubí.

Nepřímá měření jsou pak v problematice senzorů průtoku využívána mnohem častěji, především pak ta, která využívají závislosti mezi velikostí průtoku a kinetickou energií, případně rychlosti proudící tekutiny.

Podle typu výměny energie mezi senzorem a tekutinou je na průtokoměry nahlíženo jako na zařízení energii spotřebovávající, nebo energii přidávající. V senzorech, které energii spotřebovávají, jsou do kapaliny ponořena pevná nebo pohyblivá čidla, kterým pak proudící tekutina předává část své energie a umožňuje jim tak určit velikost průtoku. Příkladem takového průtokoměru jsou např. plovákové průtokoměry. Tyto průtokoměry poté přímo ovlivňují charakter a rychlost proudění tekutiny. Senzory, které energii tekutině přidávají, využívají ke své funkci nejružnější principy a zákonitosti. Mezi nejčastěji využívané patří ultrazvukové nebo elektromagnetické vlnění, případně tepelné záření. [1, 12]

### 1.3 Požadavky na průtokoměry

Při návrhu vhodného snímače průtoku je nutno brát v potaz nejrůznější vlivy, které mohou výsledek měření více či méně významně ovlivnit. Proto je nutné tyto vlivy brát v úvahu a přizpůsobit jim volbu navrhovaného senzoru pro požadovanou aplikaci. Mezi hlavní hlediska patří:

- pracovní činnost (spojitá – nespojitá, trvalá – jednorázová, laboratorní – provozní, ...)
- druh a vlastnosti měřené tekutiny (kapalina – pára – plyn, agresivita, teplota, hodnoty tlaku, viskozity, hustoty apod.)
- měřicí místo (potrubí – otevřený kanál, rozměry, přístupnost)
- rušivé vlivy senzoru (ztráty tlaku, časové zpoždění údaje)
- způsob indikace
- přesnost (nejistoty) měření
- možné opotřebení mechanických dílů

Srovnání typických typů průtokoměrů naleznete v tabulce Tab. 1 níže.

Tab. 1: Srovnání typů průtokoměrů

Typ průtokoměru		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Kapaliny	čisté	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
	pomalou proudící (< 2l/min)	+	+	+	+	-	+	?	+	+	?	-	-
	rychle proudící (> 20l/min)	+	-	?	+	?	+	+	-	-	-	-	+
	nevodivé	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-
	velké potrubí (DN > 500)	+	-	-	?	-	+	+	-	-	+	-	+
	horké (> 200 °C)	+	?	-	+	+	-	?	+	+	+	-	-
	viskozní (> 50 cP)	?	-	+	-	-	+	?	+	+	?	-	-
	kryogenické látky	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-
	potraviny	-	-	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-

#### Legenda

P1	clonové	P7	ultrazvukové
P2	plováčkové	P8	Coriolisovy
P3	terčíkové	P9	tepelné
P4	turbínové	P10	jiné (vážení, značky, rad. záření)
P5	vírové	P11	průtokoměry pevných částic
P6	indukční	P12	otevřené kanály

Jak je z tabulky Tab. 1 výše patrné, pro pomalu proudící kapaliny jsou vhodné především tyto typy průtokoměrů:

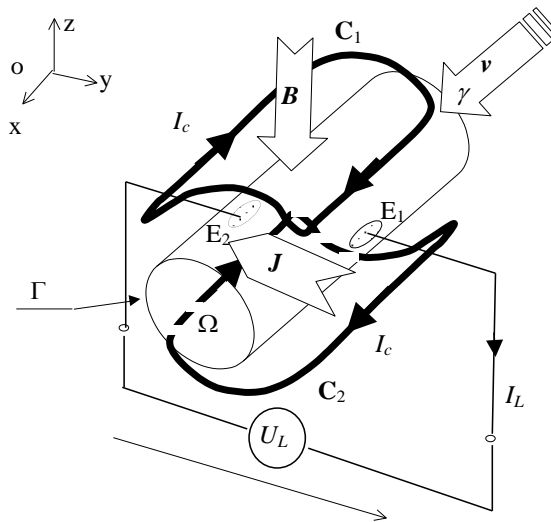
- clonové,
- plováčkové,
- terčíkové,
- turbínové,
- indukční,
- Coriolisovy
- tepelné.

Pro zadání předložené práce musí být respektován parametr, který požaduje nedestruktivní/bezkontaktní způsob měření, tzn. že do měřeného vzorku nelze jakýmkoli způsobem zasahovat a ovlivňovat jeho vlastnosti, jeví se jako nejvhodnější použít průtokoměr založený na indukčním principu.

## 1.4 Indukční průtokoměr

### 1.4.1 Princip funkce

Indukční průtokoměr [13], také magnetickoindukční, magnetický, elektromagnetický, se opírá o dva základní pilíře. Při průchodu vodivé tekutiny nevodivým (nebo odizolovaným) potrubím vzniká, v případě přítomnosti magnetického pole o indukci  $\mathbf{B}$  na elektrodách napětí  $U$  [6]. Tento princip je naznačen na obrázku Obr. 6.



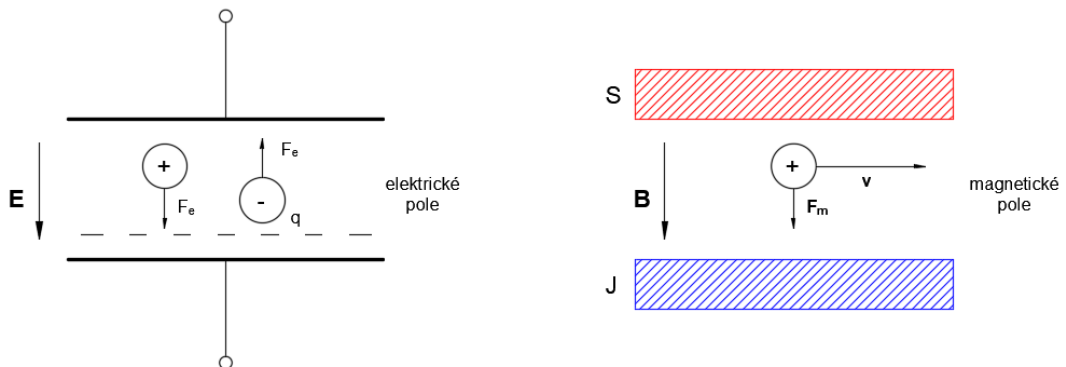
Obr. 6: Princip indukčního průtokoměru [5]

Vznik elektrického napětí lze vysvětlit dvěma základními principy. Prvním z nich je Faradayův indukční zákon. Cívky  $C_1$  a  $C_2$  vytvářejí průchodem elektrického proudu  $I_c$  magnetické pole o indukci  $\mathbf{B}$ . Roztok v potrubí má danou elektrickou vodivost  $\gamma$  a pohybuje se střední rychlostí  $\mathbf{v}$ . Na elektrodách  $E_1$  a  $E_2$  se indukuje elektrické napětí, které je závislé právě na rychlosti průtoku kapaliny. Velikosti napětí  $U$  na svorkách je tedy rovna

$$U = \iiint_{\Omega} \left( \frac{\mathbf{J}}{I_L} \times \mathbf{B} \right) \cdot \mathbf{v} dV, \quad (1.9)$$

- kde  $\Omega$  představuje prostor průtokoměru,  
 $I_L$  představuje proud procházející uzavřeným obvodem [A],  
 $\mathbf{J}$  představuje proudovou hustotu v elektricky vodivém prostředí [ $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ],  
 $\mathbf{B}$  představuje magnetickou indukci [T],  
 $\mathbf{v}$  představuje rychlost pohybu kapaliny [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Další efekt vznikající při použití principu měření, je vázán k Lorentzově zákonu ovlivnění elektricky nabitých částic kapaliny (všech rozměrů – atom, molekula, iont,...). K vysvětlení podstaty pro zahrnutí vlivu měření slouží obrázek Obr. 7.



Obr. 7: Efekty vlivu kapaliny na měřenou veličinu průtokoměru - Lorentzův zákon [1]

Magnetické pole o indukci  $\mathbf{B}$  působí na elektrický náboj  $q$ , pohybující se rychlostí  $\mathbf{v}$ . Magnetická síla  $\mathbf{F}_m$  vychyluje elektrický náboj  $q$  o rychlosti  $\mathbf{v}$ . Velikost této síly je dána vztahem

$$\mathbf{F}_m = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1.10)$$

Směr vektoru magnetické síly  $\mathbf{F}_m$  je pak určen pravidlem pravé ruky. Elektrické náboje se pak působením síly vychýlí směrem k elektrodám (umístěným ve stěně potrubí) a vytvářejí rozdíl potenciálů. Vzniká tak napětí  $U$  a velikost intenzity elektrického pole je dána

$$|\mathbf{E}| = \frac{U}{D}, \quad (1.11)$$

kde  $D$  představuje vzdálenost elektrod [m].

Elektrickou sílu  $\mathbf{F}_e$ , působící na elektrické náboje v tekutině, dle Lorentzova zákona určuje vztah

$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}. \quad (1.12)$$

Magnetická síla  $\mathbf{F}_m$  působí proti síle elektrické  $\mathbf{F}_e$  a z výše uvedených vztahů, lze pro jejich rovnováhu odvodit rovnost

$$|q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})| = q \frac{U}{d}. \quad (1.13)$$

Pro velikost napětí  $U$ , pokud budeme uvažovat, že spojnice elektrod je kolmá k rovině vektorů  $\mathbf{B}$  a  $\mathbf{v}$ , platí vztah

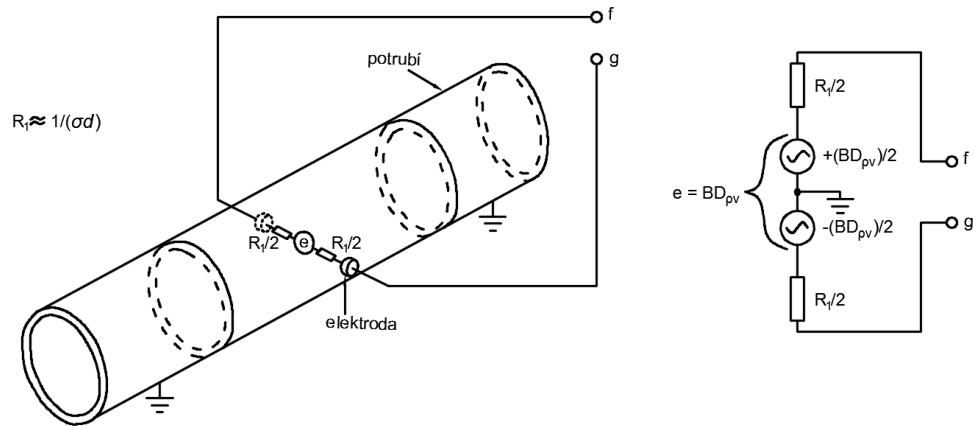
$$U = \mathbf{B}d\mathbf{v}. \quad (1.14)$$

Ke stejnému vztahu lze dojít i odvozením dle Faradayova zákona [3]. Pokud budeme uvažovat reálný průtokoměr, je nutné brát v potaz nerovnoměrné rozložení rychlosti

proudění podél průřezu.

### 1.4.2 Náhradní obvod indukčního průtokoměru

Indukční průtokoměr lze nahradit obvodem, jenž je na obrázku Obr. 8 níže.



Obr. 8: Náhradní schéma indukčního průtokoměru [1]

Z něj je patrné, že při úvaze nevodivého potrubí, se indukční průtokoměr sestává z dvou zdrojů napětí (s vnitřními odpory  $R_1/2$ ) v sérii. Uzemněný společný uzel těchto zdrojů pak nahrazuje spojení protékané kapaliny se zemí.

Za předpokladu přítomnosti homogenního elektrického pole je hodnota vnitřního odporu  $R_1$  dána vlastnostmi kapaliny (její elektrickou vodivostí  $\sigma$  [ $\text{Sm}^{-1}$ ]), plochou elektrod  $A$  [ $\text{m}^2$ ] a průměrem potrubí  $D$  [m]

$$R_1 = \frac{1}{\sigma} \frac{D}{A}. \quad (1.15)$$

### 1.4.3 Matematicko-fyzikální model indukčního průtokoměru

Podrobně lze funkci průtokoměru popsat vztahy a fyzikálními principy uvedenými dále v této části práce. Model průtokoměru lze členit na problematiku – modelů elektromagnetické části, vlivu rozložení rychlosti, vlivu magnetického pole a elektrického pole na proudící kontinuum.

Základem elektromagnetické části modelu jsou redukované Maxwellovy rovnice [7] a pro vztah proudové hustoty a magnetického pole

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1.16)$$

kde  $\mathbf{H}$  představuje vektor intenzity magnetického pole,

$\mathbf{D}$  představuje vektor indukce elektrického pole.

Platí

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (1.17)$$

kde  $\mathbf{B}$  představuje vektor indukce magnetického pole,  
pro vztah elektrického a magnetického pole

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1.18)$$

kde  $\mathbf{E}$  představuje vektor intenzity elektrického pole,  
 $\mathbf{B}$  představuje vektor indukce magnetického pole.

Rovnice kontinuity je

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = 0, \quad (1.19)$$

kde  $\mathbf{J}$  představuje vektor proudové hustoty.

Materiálová část modelu pro homogenní izotropní prostředí je charakterizována vztahy

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad (1.20)$$

kde  $\mu_0$  představuje permeabilitu vakua [ $\text{Hm}^{-1}$ ],

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}, \quad (1.21)$$

kde  $\gamma$  představuje měrnou vodivost měřené tekutiny [ $\text{m}^{-3}\text{kg}^{-1}\text{s}^3\text{A}^2$ ].

Pro vyjádření vektorových funkcí elektrického a magnetického pole jsou použity skalární elektrické a magnetické potenciály  $\phi_e$ , resp.  $\phi_m$ .

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \phi_e, \quad (1.22)$$

$$\mathbf{H} = -\operatorname{grad} \phi_m. \quad (1.23)$$

Aplikací formulovaných redukovaných Maxwellových rovnic na geometrický model a uspořádání indukčního průtokoměru znázorněné na obrázku Obr. 6, lze vyjádřit proudovou hustotu jako

$$\mathbf{J} = \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1.24)$$

kde  $\mathbf{J}$  je výsledná proudová hustota  $\mathbf{J}$  ovlivněna rychlostí proudící kapaliny a vnějším magnetickým polem  $\mathbf{B}$ , jenž je vybuzeo cívkami  $C_1$  a  $C_2$ . V prostoru  $\Omega$  se z důvodů Lorentzovy síly (1.24) a vzniku proudové hustoty  $\mathbf{J}$  vytvoří rozdílný potenciál na elektrodách  $E_1$  a  $E_2$ . Proud  $I_L$  tekoucí proudící tekutinou je z rovnice kontinuity dán vztahem



$$I_L = \iint_{S_e} \mathbf{J} d\mathbf{S},$$

$$I_L = \iint_{S_e} \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) d\mathbf{S}, \quad (1.25)$$

kde  $\mathbf{S}$  představuje orientované plochy elektrod  $E_1$  a  $E_2$  směřující do prostoru  $\Omega$ .

Velikost měrné síly  $\mathbf{f}$  působící na elementární pohybující se elektrický náboj  $q$  je dána vztahem

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (1.26)$$

celková síla v prostoru  $\Omega$  je tedy dána vztahem

$$\mathbf{F} = \iiint_{\Omega} \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV. \quad (1.27)$$

Mezi elektrodami vzniká napětí  $U_L$ , které je dána výrazem

$$U_L = \int_{E_1}^{E_2} \mathbf{E} d\ell, \quad (1.28)$$

kde  $d\ell$  představuje části spojnice středů elektrod  $E_1$  a  $E_2$ .

Elektrická intenzita je definována jako velikost síly působící na elementární elektrický náboj  $q$ , potom po dosazení vztahu (1.27) do vztahu (1.28) lze velikost napětí  $U_L$  vyjádřit vztahem

$$U_L = \int_{E_1}^{E_2} \frac{\iiint_{\Omega} \mathbf{J}(\mathbf{v}) \times \mathbf{B} dV}{I_L \Delta\ell} (\mathbf{v} + \mathbf{v}_{io}) d\ell, \quad (1.29)$$

kde  $\Delta\ell$  představuje element délky ve směru mezi elektrodami  $E_1$  a  $E_2$ ,

$\mathbf{v}_{io}$  představuje rychlost iontů v podélném směru mezi elektrodami  $E_1$  a  $E_2$ .

Po dalších úpravách vztahu (1.29) má velikost elektrického napětí mezi elektrodami průtokoměru  $E_1, E_2$  velikost

$$U_L = \iiint_{\Omega} \left( \frac{\mathbf{J}(\mathbf{v})}{I_L} \times \mathbf{B} \right) (\mathbf{v} + \mathbf{v}_{io}) dV. \quad (1.30)$$

Ze zákona zachování energie má nestlačitelná kapalina modelováno rozložení rychlosti vztahem [7]

$$\operatorname{div} \rho \mathbf{v} = 0, \quad (1.31)$$

kde  $\rho$  představuje měrnou hmotnost kapaliny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Pokud uvažujeme vířivé (nelaminární) proudění kapaliny, pro které platí, že

$$\operatorname{rot} \mathbf{v} = 2\boldsymbol{\omega}, \quad (1.32)$$

kde  $\boldsymbol{\omega}$  představuje měrnou hmotnost kapaliny, při uplatnění Stokesovy věty, Helmholtzovy věty pro pohybující se částici a rovnice kontinuity, má Navier-Stokesova rovnice, popisující proudění nestlačitelné tekutiny, pro element kapaliny tvar [8]

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \operatorname{grad} \mathbf{v} = \mathbf{A} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \mathbf{v}, \quad (1.33)$$

kde  $\mathbf{A}$  představuje vnější zrychlení,

$p$  představuje tlak [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$\nu$  představuje kinetickou viskozitu [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Pokud v rovnici (1.33) tlakové ztráty nahradíme funkcí

$$\begin{aligned} \operatorname{grad} p &= - \left( K_x \rho v_x |\mathbf{v}| + \frac{f_r}{D_h} \rho v_x |\mathbf{v}| + C_x \mu_p v_x \right) \mathbf{u}_x \\ &= - \left( K_y \rho v_y |\mathbf{v}| + \frac{f_r}{D_h} \rho v_y |\mathbf{v}| + C_y \mu_p v_y \right) \mathbf{u}_y \\ &= - \left( K_z \rho v_z |\mathbf{v}| + \frac{f_r}{D_h} \rho v_z |\mathbf{v}| + C_z \mu_p v_z \right) \mathbf{u}_z \end{aligned} \quad (1.34)$$

kde  $K$  představuje místně omezené tlakové ztráty,

$f_R$  představuje odporový součinitel [-],

$D_h$  představuje hydraulický poloměr [m],

$C$  představuje propustnost soustavy [-],

$\mu_p$  představuje dynamickou viskozitu kapaliny [ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z$  představují jednotkové vektory kartézské souřadnicové soustavy

Proudovou hustotu  $\mathbf{J}$  lze vyjádřit vztahem [7]

$$\mathbf{J} = \frac{\sum_{i=1}^{N^+} q_i^+ + \sum_{i=1}^{N^-} q_i^-}{\Delta V} \mathbf{v}_{ok}, \quad (1.35)$$

kde  $N^+$  představuje počet nosičů kladného náboje  $q^+$  [-],

$N^-$  představuje počet nosičů záporného náboje  $q^-$  [-],

$\Delta V$  představuje element objemu ionizované kapaliny [ $\text{m}^3$ ],

$\mathbf{v}_{ok}$  představuje okamžitou rychlost měřeného média [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Formulace modelu magnetického pole vychází z Biotova a Savartova zákona.

$$\mathbf{T} = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{\mathbf{J}_c \times \mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^3} dV, \quad (1.36)$$

kde  $\mathbf{T}$  představuje hledanou intenzitu magnetického pole [A.m<sup>-1</sup>],

$\mathbf{R}$  představuje vzdálenost mezi bodem, v němž je hledána intenzita  $\mathbf{T}$  a bodem v němž je zdroj magnetického pole [m],

$\mathbf{J}_c$  představuje proudovou hustotu [A.m<sup>-2</sup>].

Uvažujeme-li okrajové podmínky jako

$$\mathbf{n}\mu_0\mu_r(\mathbf{T} - \text{grad } \phi_m) = 0, \quad (1.37)$$

kde  $\mathbf{n}$  představuje normálový vektor,

$\text{grad } \phi_m$  představuje intenzitu magnetického pole jako gradient skalárního magnetického potenciálu  $\phi_m$ , intenzitu magnetického pole  $\mathbf{H}$  ve sledované oblasti představuje vztah [7]

$$\mathbf{H} = \mathbf{T} - \text{grad } \Phi_m. \quad (1.38)$$

Pomocí úprav a aplikací vztahů (1.16), (1.17) a (1.20) získáme výraz [7]

$$\text{div } \mu_0\mu_r\mathbf{T} - \text{div } \mu_0\mu_r \text{ grad } \phi_m = 0, \quad (1.39)$$

který diskretizací za pomoci aproximace skalárního magnetického potenciálu získá tvar

$$\phi_m = \sum_{k=1}^{N_\phi} \varphi_{mk} W_{mk}(x, y, z), \forall (x, y, z) \in \Omega, \quad (1.40)$$

kde  $\varphi_m$  představuje uzlovou hodnotu skalárního magnetického potenciálu [A],

$W$  představuje bázovou funkci [-],

$N_\phi$  představuje počet uzlů diskretizační sítě [-].

Dosažením vztahu (1.40) do (1.39) získáme po několika úpravách [7] soustavu rovnic, kterou lze charakterizovat výrazem

$$-\left[k_{T_{ij}}\right] + [k_{ij}]\{\varphi\} = 0, \quad i, j = 1, \dots, N_\varphi, \quad (1.41)$$

jejíž koeficienty mají tvar

$$k_{T_{ij}}^{em} = - \int_{\Omega^e} \mu^e \mathbf{t}_j \text{grad } W_i \, d\Omega \quad i, j = 1, \dots, N_e, \quad (1.42)$$

$$k_{ij}^{em} = - \int_{\Omega^e} \mu^e \text{grad } \varphi_j \text{grad } W_i \, d\Omega \quad i, j = 1, \dots, N_e, \quad (1.43)$$

kde  $\Omega^e$  představuje oblast zvoleného typu elementu diskretizační sítě,  
 $\mu^e$  představuje permeabilitu prostředí zvoleného elementu [ $\text{H.m}^{-1}$ ],  
 $N_e$  představuje počet elementů diskretizační sítě [-].

Ze vztahů (1.18), (1.19), (1.21) a (1.22) vychází model elektrického pole. V oblasti  $\Omega_{\text{fl}}$  kapaliny platí

$$\gamma \text{div grad } \phi_e = 0, \quad (1.44)$$

Na rozhraní mezi oblastí kapaliny a elektrody E platí vztah

$$\mathbf{n}\gamma(\text{grad } \phi_e) = 0, \quad (1.45)$$

kde  $\mathbf{n}$  představuje normálový vektor kolmý na povrch elektrody E.

Pomocí aproximace skalárního elektrického potenciálu a Galerkinovy metody získáme semidiskrétní tvar

$$\sum_{j=1}^{N_\varphi} - \int_{\Omega} \gamma \text{grad } \varphi_{ej} \text{grad } W_i \, d\Omega = 0, \quad i, j = 1, \dots, N_\varphi, \quad (1.46)$$

kde  $\varphi_{ej}$  představuje uzlovou hodnotu skalárního elektrického potenciálu v diskretizační síti [A].

Soustava rovnic získaná z (1.46) má tvar

$$[k_{ij}^J]\{\varphi\} = 0 \quad i, j = 1, \dots, N_\varphi, \quad (1.47)$$

Jejíž koeficienty mají tvar

$$k_{ij}^{Je} = - \int_{\Omega^e} \gamma^e \text{grad } \varphi_{ej} \cdot \text{grad } W_i \, d\Omega, \quad (1.48)$$

- kde  $\Omega^e$  představuje oblast zvoleného typu elementu diskretizační sítě,  
 $\gamma^e$  představuje měrnou vodivost kapaliny ve statickém stavu zvoleného elementu [S.m<sup>-1</sup>],  
 $N_e$  představuje počet elementů diskretizační sítě [-].  
 $W_i$  představuje bázovou funkci v uzlu  $i$ .

Složení tekutiny je pro správnou funkci zásadní. Indukční průtokoměr je schopen měřit průtok pouze elektrolytů, tedy kapalin, které jsou schopny vést elektrický proud. Čisté kapaliny, tzn. bez cizích příměsí, jsou samy o sobě špatným vodičem elektrického proudu, jelikož nemají dostatek volně pohyblivých nabitých částic. Přidáním vhodné příměsí lze však složení kapaliny změnit a vzniklý roztok se tak stává vodivým. Vhodným příkladem je např. destilovaná voda, která není vodivá. Přidáním vhodné látky (např. NaCl, KCl, ...), která se rozštěpí na pohyblivé ionty, se z ní však stane elektrolyt.

Uvažujme běžně dostupnou pitnou vodu, s chemickým složením popsáním v tabulce Tab. 2.

Tab. 2: Obsah iontů v běžné pitné vodě

Typ	Iont / sloučenina	Objemová hustota iontů $m_{io}$ [mg/dm <sup>3</sup> ]	Molární hmotnost $M_{mo}$ [g/mol]	Koncentrace iontů $c$ [mol/dm <sup>3</sup> ]
Kladné ionty	Na <sup>+</sup>	32,71	22,990	1,392E-03
	K <sup>+</sup>	1,53	39,102	3,836E-05
	Mg <sup>II+</sup>	43,81	24,312	1,802E-03
	Ca <sup>II+</sup>	157,70	40,080	3,935E-03
Záporné ionty	F <sup>-</sup>	1,58	19,998	8,316E-05
	Cl <sup>-</sup>	5,35	35,453	1,809E-04
	SO <sub>4</sub> <sup>II-</sup>	13,08	96,062	2,044E-04
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,54	62,005	8,709E-06
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	762,40	61,001	1,249E-02
El. neutrální látky	CO <sub>2</sub>	4063,00	44,010	9,332E-02
	H <sub>2</sub> O	1000000,00	18,015	2,470E+05

kde koncentrace  $c$  [-] je dána vztahem

$$c = \frac{m_{io}}{M_{mo}}. \quad (1.49)$$

Budeme-li uvažovat [7] vztahu (1.29) získáme vztah

$$\begin{aligned}
 U_L \cong & \frac{\gamma^3}{2F_c^2 I_L} \frac{1}{\sum_{k=1}^{N_{ion+}} c_k^+ N_k^{+ion}} \\
 & \cdot \sum_{e=1}^{N_\Omega} \frac{1}{\Delta V_e^2} \left( \frac{|\mathbf{E}_e| \mathbf{E}_e}{\sqrt{|\mathbf{v}_{m,e}|^2 + |\mathbf{v}_{ok,e}^+|^2}} \times \mathbf{B}_e \right) \cdot \left( \frac{\mathbf{E}_e}{\sum_{k=1}^{N_{ion-}} c_k^- N_k^{-ion}} \right. \\
 & \left. + \frac{\mathbf{E}_e}{\sum_{k=1}^{N_{ion+}} c_k^+ N_k^{+ion}} + \frac{\Delta V_e F_c}{\gamma} \mathbf{v}_{m,e} \right) + \frac{\gamma^3}{2F_c^2 I_L} \frac{1}{\sum_{k=1}^{N_{ion-}} c_k^- N_k^{-ion}} \\
 & \cdot \sum_{e=1}^{N_\Omega} \left( \frac{|\mathbf{E}_e| \mathbf{E}_e}{\sqrt{|\mathbf{v}_{m,e}|^2 + |\mathbf{v}_{ok,e}^-|^2}} \times \mathbf{B}_e \right) \\
 & \cdot \left( \frac{\mathbf{E}_e}{\sum_{k=1}^{N_{ion-}} c_k^- N_k^{-ion}} + \frac{\mathbf{E}_e}{\sum_{k=1}^{N_{ion+}} c_k^+ N_k^{+ion}} + \frac{\Delta V_e F_c}{\gamma} \mathbf{v}_{m,e} \right), \quad (1.50)
 \end{aligned}$$

kde

$$\mathbf{v}_{ok,e}^+ = \frac{\mathbf{J}_e}{F_c \Delta V_e i k^+}, \quad (1.51)$$

$$\mathbf{v}_{ok,e}^- = \frac{\mathbf{J}_e}{F_c \Delta V_e i k^-}, \quad (1.52)$$

$$i k^+ = \sum_{k=1}^{N_{ion+}} c_k^+ N_k^{+ion} = 1,2902 \cdot 10^{-5} \text{ mol/m}^3, \quad (1.53)$$

$$i k^- = \sum_{k=1}^{N_{ion-}} c_k^- N_k^{-ion} = -1,3175 \cdot 10^{-5} \text{ mol/m}^3, \quad (1.54)$$

kde  $i k^+$  představuje koncentraci všech kladných iontů [-],

$i k^-$  představuje koncentraci všech záporných iontů [-].

Pokud je respektována podmínka elektro-neutrality roztoku, vztah (1.50) se zjednoduší na

$$\begin{aligned}
 & U_L \\
 & \cong \left( \frac{1}{|ik^+|} + \frac{1}{|ik^-|} \right) \cdot \frac{1}{2F_c^2 I_L} \\
 & \cdot \sum_{e=1}^{N_\Omega} \frac{|J_e|}{\Delta V_e^2 \sqrt{\left( |v_{m,e}|^2 + \left( \frac{|v_{ok,e}^+| + |v_{ok,e}^-|}{2} \right)^2 \right)}} \cdot (J_e \times B_e) \\
 & \cdot \left( J_e \left( \frac{1}{|ik^+|} + \frac{1}{|ik^-|} \right) + \Delta V_e F_c v_{m,e} \right)
 \end{aligned} \tag{1.55}$$

#### 1.4.4 Faktory ovlivňující funkci průtokoměru

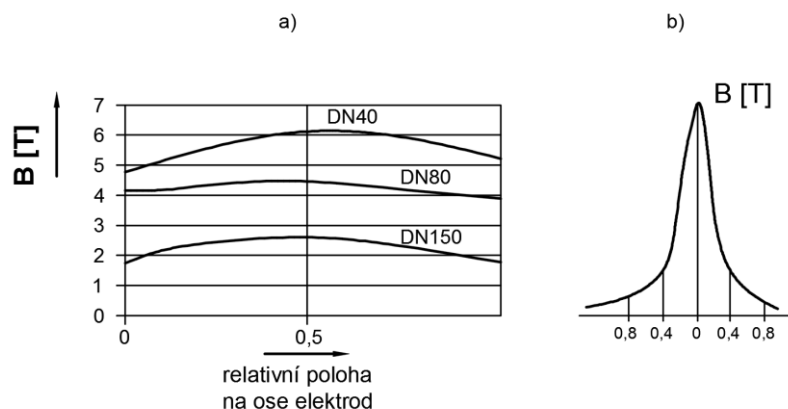
Správná funkce indukčního průtokoměru je ovlivněna mnoha faktory. Vztahy odvozené v dosavadním textu předpokládají ideální podmínky, např. přítomnost rovnoměrné rozložení rychlosti proudění po průřezu potrubí, či přítomnost homogenního magnetického a elektrického pole. Je však zřejmé, že těchto podmínek není možné v reálné aplikaci průtokoměru dosáhnout. Pro obecný rychlostní profil je výstupní napětí dáno vztahem

$$u = B \sum_{i=1}^n v_i \Delta l_i. \tag{1.56}$$

Z tohoto vztahu je patrné, že výstupní napětí získáme rozdělením průřezu na části  $\Delta l$ , ve kterých má tekutina přibližně stejnou rychlost proudění, a sečtením jednotlivých příspěvků.

Dalšími z faktorů, které významně ovlivňují funkci průtokoměru, jsou vlastnosti proudící tekutiny. Vodivost měřené kapaliny musí být homogenní. Pokud tomu tak není, je nutné směs před měřením průtoku tzv. homogenizovat, tzn. z ní udělat stejnorodou látku. Pokud tato podmínka není při měření splněna, výstupní signál může obsahovat rušivé složky (např. náhlé a značné změny amplitudy) a měření nelze považovat za správné. Další nepříjemností, související především se složením měřené tekutiny, je vznik usazenin. Usazeniny mohou zmenšit průřez potrubí, čímž dle (1.6) dojde ke zrychlení průtoku a s tím je spojený neopodstatněný nárůst indukovaného napětí. Navíc, pokud se jedná o usazeniny vodivé, mohou tyto v extrémním případě způsobit i spojení elektrod, čímž by se průtokoměr stal nefunkčním. Ulpíváním usazenin na elektrodách dochází ke zmenšení vzdálenosti mezi elektrodami a tím dle (1.14) ke zmenšení indukovaného napětí. Ačkoliv se zdá, že tyto dva jevy působí protikladně, v praxi je jejich vzájemná kompenzace velmi výjimečná [1]. Přítomnost plynových bublin v tekutině taktéž ovlivňuje výsledek měření, kdy dojde ke zvětšení indukovaného napětí a tím pádem k nesprávnému zobrazení vyššího průtoku, než je skutečný.

Rozložení magnetického pole vybuzeného cívkami průtokoměru také ovlivňuje výsledek měření. Na obrázku Obr. 9 je znázorněno rozložení magnetického pole cívek podél osy potrubí.



Obr. 9: a) Průběhy magnetické indukce podél osy elektrod, b) Pokles indukce na krajích budících cívek [1]

Z obrázku výše je patrné, že magnetické pole, které je cívkami buzeno, není homogenní a je rozloženo pouze v jistém úseku podél osy potrubí. Zbytek potrubí je ovlivněn magnetickým polem pouze minimálně, a tak nepřispívá k velikosti výstupního napětí. Průměr potrubí také, dle Obr. 9a), hraje při měření průtoku značnou roli. Ze závislosti vyplývá, že rozdíl magnetické indukce na krajích a na středu osy elektrod je při menším průměru potrubí větší. Tato závislost ale na velikost výsledného napětí nemá značný vliv, jak by se mohlo zdát, jelikož samotné indukované napětí je dle (1.14) přímo úměrné vzdálenosti elektrod.

### 1.4.5 Vliv použitého potrubí

Mezi velmi důležité faktory se řadí i vlastnosti použitého potrubí. Zde rozlišujeme dva základní typy potrubí – elektricky vodivé a nevodivé. Využití indukčního průtokoměru společně s magneticky vodivým potrubím je vyloučeno, jelikož by značně ovlivňovalo magnetické pole vybuzené cívkami průtokoměru. Pro využití indukčního průtokoměru se jako nejjednodušší jeví využití nevodivého potrubí, jelikož jeho vlastnosti nijak zásadně neovlivňují měření a lze se řídit principy, které byly prezentovány v dosavadních kapitolách.

Nevodivé potrubí má mnoho podob, nejčastěji se využívají nevodivé materiály (plast – především polyethylen PE, polyvinylchlorid PVC apod.), případně lze využít izolačních výstleky (např. pryž, keramiku, teflon, či jiné plasty). Výstelky je však nutné přizpůsobit použité tekutině, aby odolaly případným chemickým účinkům, změnám teplot a dalším vlivům.

V případě, že je nutné využít elektricky vodivé potrubí, je výsledné napětí vzniklé na elektrodách značně ovlivněno. Při působení magnetického pole na vodivé potrubí je v potrubí indukováno napětí  $U$ , které má za následek, vzhledem k tomu, že trubka má jistý (i když malý) odpor, vznik proudu ve stěnách trubky.



Toto napětí je dáno vztahem

$$U = \frac{2DB\bar{v}}{1 + \frac{d^2}{D^2} + \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \left[1 - \frac{d^2}{D^2}\right]}, \quad (1.57)$$

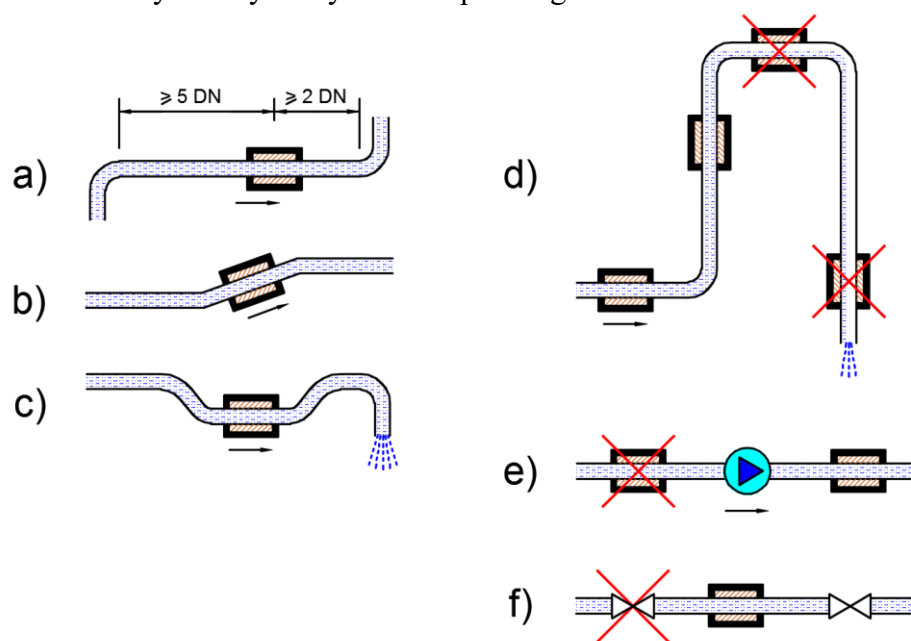
- kde  $d$  představuje vnitřní průměr potrubí [m],  
 $D$  představuje vnější průměr potrubí [m],  
 $\sigma_1$  představuje měrnou elektrickou vodivost kapaliny [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ],  
 $\sigma_2$  představuje měrnou elektrickou vodivost stěny potrubí [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ],  
 $B$  představuje magnetickou indukci působící v kolmém směru na potrubí [T].

Vzniklý proud pak vyvolá magnetické pole, které negativně ovlivňuje pole vyvolané budícími cívkami.

### 1.4.6 Zásady instalace průtokoměru

Pro správnou funkci indukčního průtokoměru je nutné dodržovat několik zásad. Na obrázku Obr. 10a-f je naznačeno několik základních doporučení [3].

- průtokoměr by měl být instalován tak, aby před ním i za ním byly rovné úseky potrubí bez ohybů alespoň o délce 5DN, respektive 2DN,
- průtokoměr, osazen na potrubí, které má vodorovnou polohu, by měl být umístěn do stoupacích úseků,
- průtokoměr lze umístit do tzv. pachové uzávěrky („sifonu“),
- umístění průtokoměru do nejvyššího bodu potrubí není vhodné, především kvůli hromadění plynových bublin, nebo v případě nedostatečného průtoku pak není potrubí zaplněno v celém průřezu
- stejně tak se nedoporučuje umístění průtokoměru do sání čerpadla,
- průtokoměr by měl být vždy umístěn před regulační či uzavírací armaturu

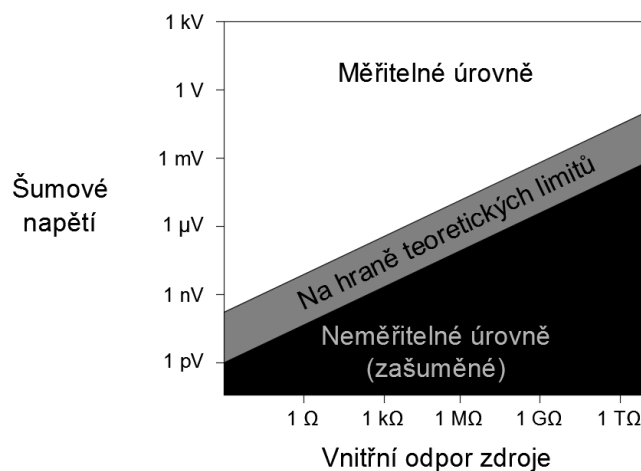


Obr. 10: Zásady instalace indukčního průtokoměru [3]

Velmi důležitým faktorem, ovlivňujícím správnou funkci přístroje, je pak správné provedení uzemnění snímače. Pokud není uzemnění správně provedeno, hrozí kvůli bludným proudům vznik stejnosměrné složky na měřeném napětí [3].

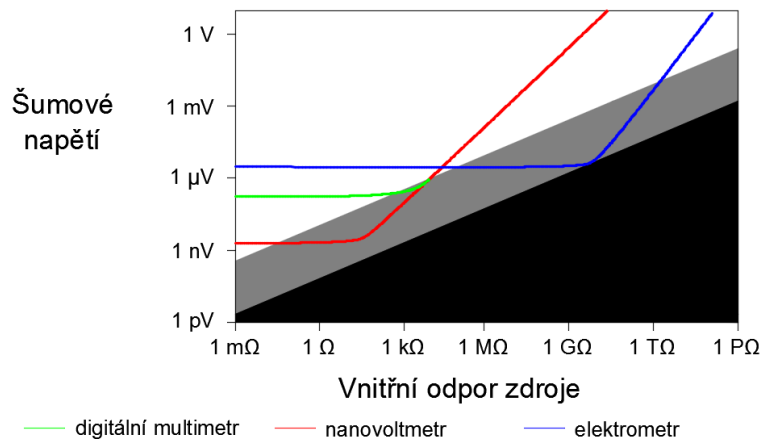
## 1.5 Měření nízkourovňových veličin

V současné době se pro měření různých veličin nejčastěji používají digitální multimetry, nicméně tyto přístroje nejsou vhodné pro měření malých úrovní signálu, jako spodní hranice pro jejich použití se uvádí hodnoty  $1\ \mu\text{V}$ , případně  $1\ \mu\text{A}$  [14]. Tato hranice je taktéž závislá na vnitřním odporu zdroje měřeného signálu. Na obrázku Obr. 11 je teoretická hranice naznačena. Je nutné poznamenat, že grafická závislost odpovídá teplotě  $300\ \text{K}$ .



Obr. 11: Teoretické limity měření napětí [14]

Pro měření signálů o opravdu malých úrovních tedy není vhodné využívat multimetry, ale použít jiné přístroje, případně metody. Příklad srovnání jednotlivých přístrojů je naznačen na obrázku Obr. 12.



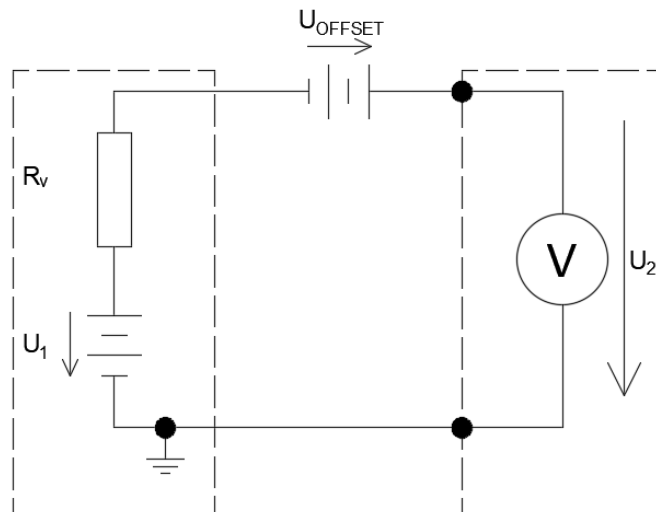
Obr. 12: Porovnání typických rozlišovacích hodnot jednotlivých přístrojů [14]

## 1.5.1 Metody měření nízkourovňových veličin

Výsledky měření veličin o nízké úrovni mohou být významně zatíženy vlivy okolního prostředí a samotnou metodou měření. Při takto přesných měřeních (v řádech  $\mu\text{V}$  a menších) je nutné tyto vlivy maximálně omezit, aby bylo možné výsledek měření považovat za přesný, opakovatelný, a tedy i správný. Mezi hlavní zdroje problémů rušení snímané veličiny patří přítomnost šumu, dále nežádoucí stejnosměrné složky, tzv. offsetu a v neposlední řadě i vlastnosti měřicího přístroje.

### 1.5.1.1 Vliv způsobené měřicími přístroji

Pokud připojíme voltmetr na elektrický obvod, ve kterém neprochází žádný elektrický proud a není připojen k žádnému vstupnímu elektrickému napětí, měl tento voltmetr ukazovat nulové hodnoty. Přístroj však nemusí ukazovat nulovou hodnotu, jelikož se v měřeném elektrickém obvodu mohou nacházet i další zdroje rušivých napětí a offset ve vstupních obvodech měřicího přístroje. Tento jev je naznačen ve schématu na Obr. 13.



Obr. 13: Vliv rušivých napětí na přesnost měření [14]

Ze schématu na Obr. 13 je patrné, že tato rušivá napětí mají vliv na hodnotu naměřenou voltmetrem. Tato hodnota bude mít tvar

$$U_2 = U_1 + U_{OFFSET}, \quad (1.58)$$

kde  $U_1$  představuje velikost napětí na svorkách zdroje [V],  
 $U_{OFFSET}$  představuje velikost rušivého napětí [V].

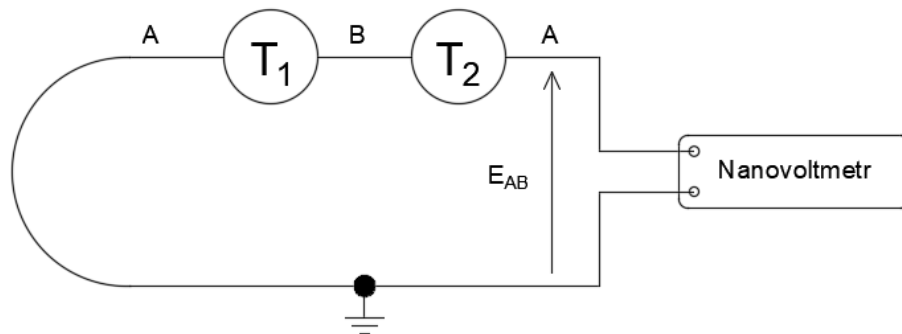
Napětí  $U_{OFFSET}$  může mít i opačnou polaritu, v tom případě bude hodnota naměřeného napětí rovna

$$U_2 = U_1 + U_{OFFSET}, \quad (1.59)$$

kde  $U_1$  představuje velikost napětí na svorkách zdroje [V],  
 $U_{OFFSET}$  představuje velikost rušivého napětí [V].

### 1.5.1.2 Vlivy způsobené termoelektrickým jevem

Termoelektrická napětí patří mezi nejčastější příčiny chyb vnášených do procesu měření nízkých úrovní měřených veličin [14]. Tyto chyby vznikají, pokud mají jednotlivé prvky v obvodu jinou teplotu, případně pokud jsou k sobě spojeny vodiče z jiných materiálů. Takto vzniklé prvky můžeme považovat za jakési miniaturní termočlánky, jejichž přítomnost vyvolává v obvodu další „přídavná - rušivá“ napětí. Tato napětí jsou sice velmi malá, nicméně při měření velikosti napětí v řádech desítek až stovek  $\mu\text{V}$  je nutné uvažovat jejich vliv na měřenou veličinu [12]. Tato napětí mohou vzniknout např. i použitím nevhodného materiálu pájky, případně i spojením vodičů ze stejného typu materiálu, ale použitého od jiného výrobce. Schéma jejich vzniku je naznačeno na Obr. 14.



Obr. 14: Vlivy způsobené termoelektrickými napětími [14]

Z obrázku Obr. 14 je patrné, že v obvodu jsou v sérii za sebou použity vodiče z rozdílných materiálů A a B. Takto vzniklé nežádoucí napětí  $E_{AB}$  má velikost

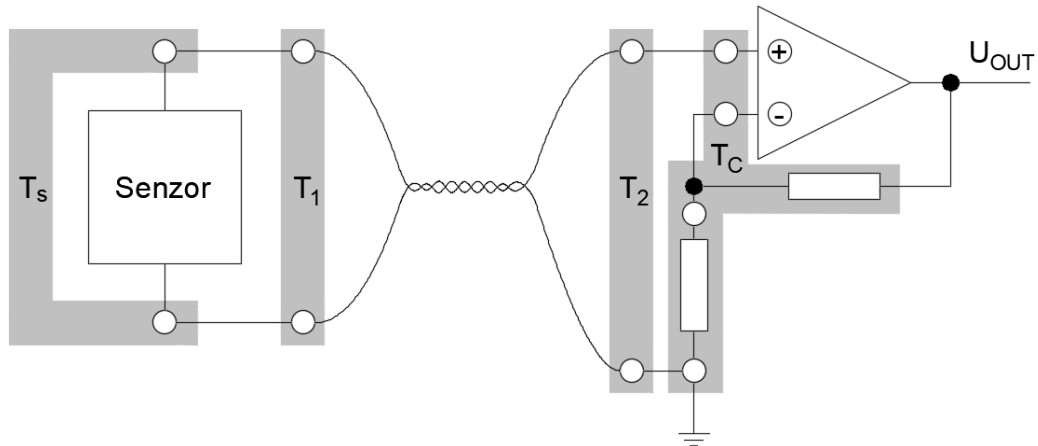
$$E_{AB} = Q_{AB} (T_1 - T_2), \quad (1.60)$$

kde  $Q_{AB}$  představuje hodnotu Seebeckova koeficientu pro použité materiály [ $\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$ ],

$T_1, T_2$  představují teplotu v bodech spojení rozdílných materiálů [K].

Na výslednou velikost tohoto napětí mají vliv i další okolnosti, jako jsou např. způsob, jakým bylo spojení provedeno, typ použité pájky, a zda-li je spoj očištěn a nezoxidován. Vhodné je použít lisované spojení, které má Seebeckův koeficient roven až hodnotě pohybující se v řádech  $\leq 200 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Naopak nesprávně provedený, či zoxidovaný pájený spoj může dosáhnout hodnot až Seebeckova koeficientu  $1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ .

Vliv termoelektrického napětí lze minimalizovat teplotní stabilizací obvodu, jak je naznačeno na schématu na Obr. 15.



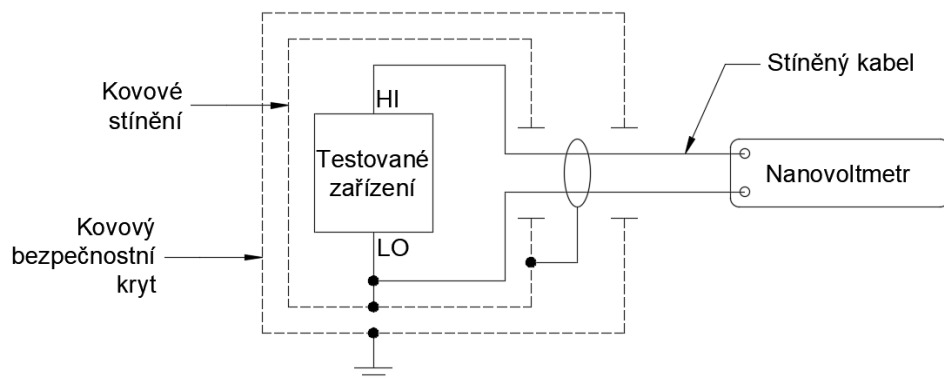
Obr. 15: Schéma teplotního vyrovnání termoelektrických napětí [14]

Teplotní stabilizace lze dosáhnout vhodným provedením plošného spoje, minimalizací počtu konektorů, přepínačů a podobných prvků v obvodu. Tyto všechny prvky jsou zdroje termoelektrického napětí, jako nežádoucího vlivu na výsledné měřené elektrické napětí.

### 1.5.1.3 Vlivy způsobené okolním prostředím

V současné době je běžným prostorem všudypřítomné elektromagnetické záření (vznikající z lidské činnosti, a to technickými zařízeními), které může významně ovlivnit výsledky nízko-úrovňových měření. Ať už se jedná např. o TV či rozhlasový signál, nebo impulsní signály, rušení ze špatně zkonstruovaných a navržených přístrojů, je nutné toto záření ovlivnit na minimum, protože může zcela zastínit požadovanou snímanou a vyhodnocovanou veličinu. Tyto signály se souhrnně označují jako RFI (radio frequency interference) a EMI (electromagnetic interference).

Jejich vliv lze minimalizovat použitím vhodných a odpovídajících stínění, jehož příkladné uspořádání je naznačeno na obrázku Obr. 16.



Obr. 16: Příkladné uspořádání stínění pro minimalizaci vlivů EMI a RFI [14]

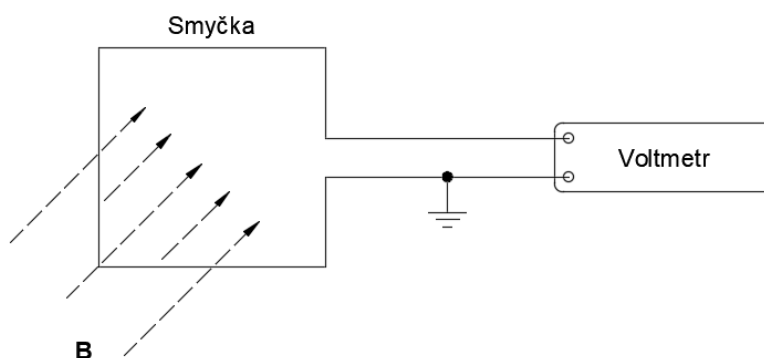
Základní zásadou je, že kovovým (elektricky vodivým materiálem) stíněním by mělo být testované zařízení kompletně obklopeno a stíněný by měl být i elektrický kabel směřující do měřicího přístroje, přenášející snímanou veličinu. Pokud se v testovaném zařízení vyskytuje elektrické napětí vyšší, než je bezpečné dotykové, podle platných ČSN tzn. 25 V AC, příp. 60 V DC v normálních a nebezpečných prostorech, je nutné využít i kovového bezpečnostního krytu, který je pak přímo uzemněn. Hodnoty pro dotykové krátkodobé dotykové působení jsou dvojnásobné.

#### 1.5.1.4 Vlivy způsobené přítomností magnetického pole

Rušivá elektrická napětí jsou v měřeném zařízení indukována za splnění jedné z následujících podmínek (Faradayův indukční zákon [6], (1.61)):

- magnetické pole je proměnné v čase a v jeho poli se nachází vodič, na kterém může být napětí indukováno,
- pokud je měřený obvod v pohybu vůči zdroji magnetického pole.

Pokud se v elektrickém obvodu nacházejí smyčky o nenulové výsledné ploše, kterými prochází časově proměnný magnetický tok, dochází k jevu indukce elektrického napětí, které může být v procesu snímání veličiny nežádoucí. Tento jev je zachycen na obrázku Obr. 17.



Obr. 17: Indukce nežádoucích elektrických napětí [14]

Velikost indukovaného napětí  $U_B$  je dána vztahem

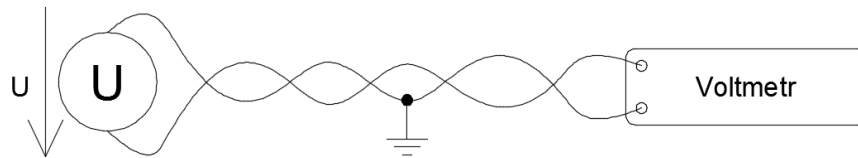
$$U_B = -\frac{d\Phi}{dt},$$

$$U_B = -\frac{d(\mathbf{B} \cdot \mathbf{S})}{dt}, \quad (1.61)$$

$$U_B = -\mathbf{B} \frac{dS}{dt} \pm \frac{d\mathbf{B}}{dt} S,$$

kde  $\Phi$  je magnetický tok [Wb],  
 $S$  představuje orientovanou plochu smyčky [m<sup>2</sup>],  
 $\mathbf{B}$  představuje vektor magnetické indukce [T],  
 $dt$  představuje element času [s].

Ze vztahu (1.70) je patrné, že plocha nebo vektor výsledných ploch  $S$  musí být co nejmenší. Minimalizace ploch smyček se provádí tzv. kroucením kabelů měřicích sond, které je znázorněno na obrázku Obr. 18.

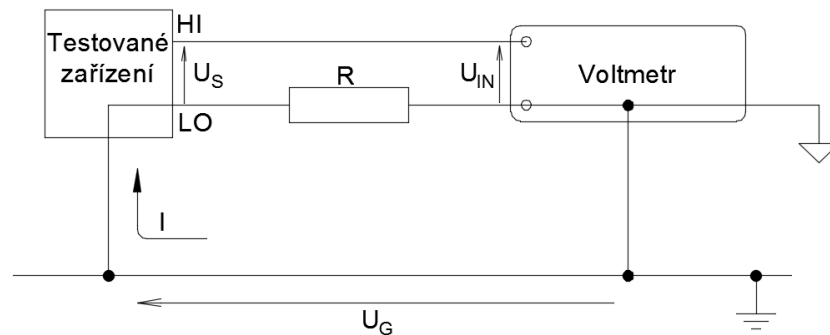


Obr. 18: Příklad minimalizace indukovaných rušivých napětí [14]

Napětí indukovaná v těchto malých smyčkách mají opačnou polaritu, proto se vzájemně vyruší (orientované plochy). Zároveň je možno využít i tzv. stíněných elektrických kabelů nebo i upravených kompenzovaných kabelů, které jsou schopny vliv vnějšího magnetického pole minimalizovat.

### 1.5.1.5 Elektrická rušení vyvolané zemními smyčkami

Rušivé/nežádoucí elektrické napětí může vzniknout i z důvodů nesprávně provedeného zapojení vztažných elektrod (zemnění). Pokud je elektrický obvod připojen na více místech ke vztažným elektrodám (rozdělení signálové vztažné soustavy a napájecí vztažné soustavy), může se z důvodů plochy a odporu vytvořené zemní smyčky (s ohledem na délku šířené elektromagnetické vlny) na této dráze indukovat rušivé elektrické napětí, jak je znázorněno na obrázku Obr. 19.



Obr. 19: Vznik rušivého elektrického napětí na vytvořené zemní smyčce [14]

Na zemní smyčce tak vzniká elektrické napětí  $U_G$ , které zatěžuje užitečnou hodnotu výstupu měření. Elektrické napětí indikované voltmetrem  $U_{IN}$  pak bude mít velikost:

$$U_{IN} = U_s + U_G, \quad (1.62)$$

kde  $U_s$  představuje velikost elektrického napětí měřeného signálu [V],  
 $U_G$  představuje velikost rušivého elektrického napětí [V], které je dáno vztahem:

$$U_G = I \cdot R, \quad (1.63)$$

kde  $I$  představuje velikost elektrického proudu, který protéká zemní smyčkou [A],  
 $R$  představuje velikost vstupního odporu měřicího ústrojí (typicky kolem 100 m $\Omega$  [14]).

V případě, že měřené elektrické napětí má velmi malou hodnotu (řádově nV až mV), může nežádoucí elektrické napětí indukované v zemní smyčce měřené napětí zcela potlačit a měření znehodnotit. Řešením tohoto jevu je zapojení do vztažné soustavy všech prvků v měřicí sestavě v jednom bodě, případně využívat přístroje, které jsou od vztažného bodu izolované.

## 1.5.2 Přístroje vhodné pro měření nízkourovňových veličin a jejich vlastnosti

Na základě poznatků shrnutých výše je patrné, že pro měření nízkých úrovní veličin – elektrického napětí, elektrického proudu, které se blíží k teoretickým limitům měřitelnosti, je nutné využít některý z přístrojů, které jsou dále uvedeny.

### 1.5.2.1 Digitální multimetr

Digitální multimetry představují v současné době velmi široce zastoupenou skupinu měřicích přístrojů. V závislosti na vlastnostech vstupních obvodů tak lze získat přístroj s rozlišením od 3 ½ čísel, vhodný především pro rychlá přehledová měření, po velmi přesné přístroje s rozlišením 8 ½ čísel. Jen velmi zřídka však tyto přístroje umožňují měřit úrovně, které se přibližují teoretické hranici měřitelnosti. Nicméně již dnes umožňují nejpřesnější přístroje měřit stejnosměrná elektrická napětí od 10 nV, elektrické proudy od 10 pA a elektrické odpory v rozmezí od 100  $\mu\Omega$  do 1 G $\Omega$  [14].

### 1.5.2.2 Elektrometr

Velmi zjednodušeně lze elektrometr považovat za velmi přesný multimetr, jehož zvláštní vstupní parametry umožňují měřit i velmi malé veličiny. Elektrometr lze využít pro měření elektrického napětí, proudu, odporu a náboje.

Při měření napětí má elektrometr vstupní odpor (vyšší než 100 T $\Omega$ ). Přístrojem tak při měření prochází proud nízké úrovně (menší než 3 fA). Tyto vlastnosti tak umožňují měření na velmi citlivých obvodech, jelikož je prakticky nezatěžují a neovlivňují jejich funkci. Jako nevýhoda je velká citlivost vstupních obvodů na náhodný elektrický náboj a



následná destrukce vstupních obvodů.

Elektrometr lze využít pro měření velmi malých elektrických proudů, řádově v fA ( $10^{-15}$  A). Spodní hranice měřitelnosti je dána pouze vlastnostmi elektrometru a hodnotou 0.16 AA. Využívá se např. pro měření el. proudu polovodičovými diodami v závěrném směru, případně dalších vlastností polovodičových součástek.

Pro měření velikosti el. odporu se využívají dvě metody – metoda měření s konstantním proudem a metoda s konstantním napětím. Při použití metody s konstantním proudem je elektrometr díky své velmi vysoké impedanci schopen měřit odpory do velikosti až 200 G $\Omega$ . Metoda konstantního napětí umožňuje měřit odpory až do velikosti 10 P $\Omega$  ( $10^{16}$   $\Omega$ ). Tuto metodu lze považovat za nepřímou, protože elektrometr využívá konstantního napětí a měří elektrický proud – elektrický odpor pak dopočítává na základě změřených hodnot.

Dále lze elektrometr využít i pro měření elektrického náboje, řádově již od hodnot kolem 10 fC ( $10^{-14}$  C).

### 1.5.2.3 Nanovoltmetr

Nanovoltmetr umožňuje měřit velmi malá elektrická napětí. Na rozdíl od elektrometru se využívá pro měření napětí, jejichž zdroj má malý vnitřní elektrický odpor. Tato závislost je znázorněna na obrázku Obr. 12.

### 1.5.2.4 Pikoampérmetr

Tento typ měřicího přístroje je svým principem velmi blízký elektrometru ve funkci ampérmetru. Oba typy mají srovnatelné parametry, jako jsou rychlost měření a minimální zatížení či ovlivnění měřeného obvodu. Výhodou pikoampérmetru je pak nižší cena, která je však dána mnohem větší univerzálností elektrometru.

### 1.5.2.5 Přístroje SMU (source measure unit)

Tyto přístroje jsou schopné signál generovat i měřit. Umožňují měření elektrických napětí, proudů a zároveň mohou pracovat i jako jejich zdroj. Mohou pracovat jako zdroj napětí, a přitom měřit proud, případně naopak, tedy jako zdroj proudu a měřit napětí. Využívají se pro měření V-A, případně A-V, charakteristik polovodičových součástek. Moderní přístroje jsou již schopny v sobě vhodně kombinovat vlastnosti elektrometru a nabízejí tak zajímavou alternativu pro měření veličin nízkých úrovní. Typicky je jejich vstupní odpor alespoň 100 T $\Omega$ , což umožňuje měření velmi malých elektrických proudů a omezuje vliv měřicího přístroje na analyzovaný obvod. Pro měření proudu dosahují citlivosti řádově 10 fA. Přístroje SMU nabízejí mnoho měřicích modů, např. rozmítání, které umožňují všestranné využití přístroje při měření V-A charakteristik. Mezi další přednosti patří zpravidla velká zobrazovací jednotka, která umožňuje sledovat více měřených či vstupních veličin zároveň.

## 1.6 Impedance

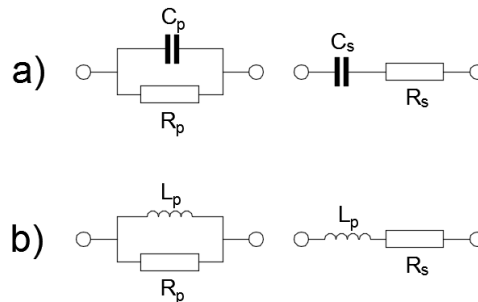
Každý elektrický prvek, případně jeho část, má vlastnost známou jako elektrická impedance, která je vyjádřena pro harmonický průběh okamžitých hodnot jako

$$\begin{aligned}\bar{Z} &= R + jX, \\ \bar{Z} &= |\bar{Z}|e^{j\varphi}\end{aligned}\tag{1.64}$$

kde  $R$  představuje reálnou složku impedance,  
 $jX$  představuje imaginární složku impedance,  
 $\varphi$  představuje fázový posun mezi reálnou a imaginární složkou impedance.

Fázový posuv charakterizuje chování prvku v obvodu. Reálná složka  $R$  způsobuje ztrátu elektrického výkonu, imaginární složka pak posun časového průběhu veličiny, například elektrického proudu vůči časovému průběhu el. napětí. Pokud je obvod, nebo jeho část, napájena stejnosměrným elektrickým napětím, k uplatnění imaginární složky impedance nedochází.

Reálné pasivní prvky (kondenzátor, cívka) je ve střídavých (harmonických) obvodech vhodné nahradit náhradními schémata, která pro jistou část frekvenčního spektra vystihují jejich elektrické vlastnosti, a jsou znázorněna na obrázku Obr. 20.



Obr. 20: Náhradní schéma a) kondenzátoru b) cívky

### 1.6.1 Impedance cívky

V obvodech stejnosměrného napětí se cívka projevuje jako elektrický vodič, její impedance má nulovou imaginární složku a vykazuje pouze reálnou část. Ve střídavých obvodech se uplatňuje výrazně imaginární složka impedance, která má tedy podobu

$$\begin{aligned}\bar{Z} &= j\omega L, \\ \bar{Z} &= j2\pi fL,\end{aligned}\tag{1.65}$$

kde  $\omega$  představuje úhlový kmitočet [ $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  
 $L$  představuje indukčnost cívky [H],  
 $f$  představuje kmitočet [Hz].

Velikost vlastní indukčnosti cívky je dána vztahem

$$L = \frac{X}{2\pi f}, \quad (1.66)$$

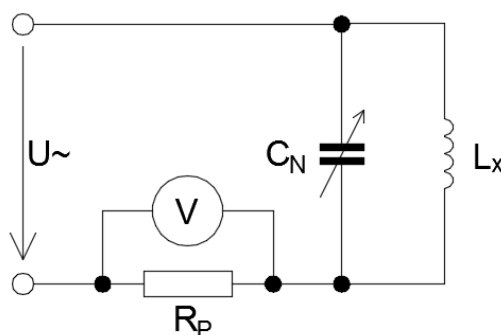
kde  $X$  představuje indukanci cívky (imaginární složka její impedance).

Dalším parametrem charakterizujícím chování cívky je tzv. Al konstanta, která popisuje závislost mezi velikostí indukčnosti cívky  $L$  a počtem závitů  $n$ . Charakterizuje tak vlastnosti jádra cívky. Lze ji získat vztahem

$$Al = \frac{L}{n^2}. \quad (1.67)$$

## 1.6.2 Rezonanční metody měření impedance

Mezi nejjednodušší z rezonančních metod měření impedance lze zařadit zapojení znázorněné na obrázku Obr. 21.



Obr. 21: Měření impedance rezonanční metodou

Rezonanční obvod je složený z cívky s indukčností  $L_X$  a laditelného kondenzátoru s kapacitou  $C_N$ . Změnou kapacity  $C_N$  se obvod dostane do rezonance, jeho impedance se zvýší na maximum a vykazuje imaginární složku rovnu nule. Elektrický proud obvodem se tak sníží na minimum, vysokoimpedanční voltmetr tedy ukazuje minimální výchylku. Pomocí vztahu

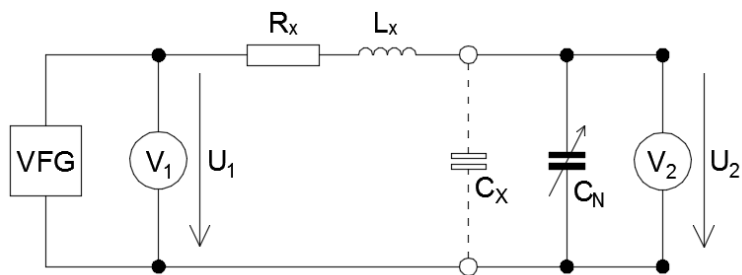
$$L_X = \frac{1}{\omega^2 C_N}, \quad (1.68)$$

kde  $\omega$  představuje úhlovou frekvenci,

$C_N$  představuje nastavenou hodnotu kapacity laditelného kondenzátoru,

lze určit hodnotu indukčnosti  $L_X$  hledané cívky.

Podobný princip využívají i tzv. Q-metry, které však navíc kromě elektrické indukčnosti měří i elektrickou kapacitu. Dalším možným měřeným parametrem je činitel jakosti cívky  $Q$  a ztrátový činitel kondenzátoru  $tg \delta$ . Princip funkce Q-metru je znázorněn na obrázku Obr. 22.



Obr. 22: Měření impedance pomocí Q-metru

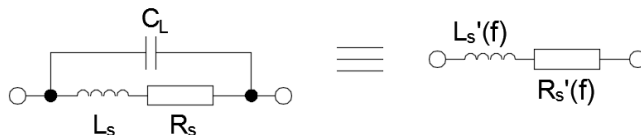
Sériový rezonanční obvod složený z cívky  $L_X$  a laditelného kondenzátoru  $C_N$  je právě pomocí laditelného kondenzátoru nastaven do rezonance a voltmetr  $V_2$  detekoval maximální možné elektrické napětí. Vztah pro výpočet indukčnosti  $L_X$  je totožný se vztahem (1.68). Vyčíslení činitele jakosti cívky  $Q$  je dáno

$$Q = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega L_X}{R_X}, \quad (1.69)$$

kde  $\omega$  představuje úhlovou frekvenci nastavené v obvodu,

$R_X$  představuje hodnotu odporu zařazeného do rezonančního obvodu.

Při vyšších kmitočtech se u reálných pasivních prvků začnou projevovat i další elektrické vlastnosti [9]. U cívek se začne projevovat jejich vlastní kapacita  $C_L$  (zahrnující především kapacity mezi závity a mezi vrstvami vinutí), jak je znázorněno i na obrázku Obr. 23.



Obr. 23: Náhradní obvod cívky pro vyšší frekvence  $f$  pracovního režimu

Tyto vlastnosti ovlivní způsob měření a mohou být využity nebo mohou být nežádoucí. Prvky  $L'_s(f)$  a  $R'_s(f)$  jsou frekvenčně závislé. Pokud změříme jejich hodnotu při dvou různých frekvencích, získáme soustavu čtyř rovnic o třech neznámých. Pokud měření provádíme na frekvencích, které jsou mnohem menší, než vlastní rezonanční kmitočet měřené cívky [9], platí pro velikost těchto prvků vztahy

$$L'_s(\omega) = \frac{L_S(1 - \omega^2 L_S C_L) - C_L R_S^2}{(1 - \omega^2 L_S C_L)^2 + \omega^2 C_L^2 R_S^2} \doteq \frac{L_S}{(1 - \omega^2 L_S C_L)^2}, \quad (1.70)$$

$$R'_s(\omega) = \frac{R_S}{(1 - \omega^2 L_S C_L)^2 + \omega^2 C_L^2 R_S^2} \doteq \frac{R_S}{(1 - \omega^2 L_S C_L)^2}. \quad (1.71)$$

Pokud budeme uvažovat tento vysokofrekvenční náhradní obvod v zapojení znázorněném na obrázku Obr. 21 reálného prvku, je kapacita cívky  $C_L$  připojena paralelně k laditelnému kondenzátoru  $C_N$ . Potom pro rezonanci platí

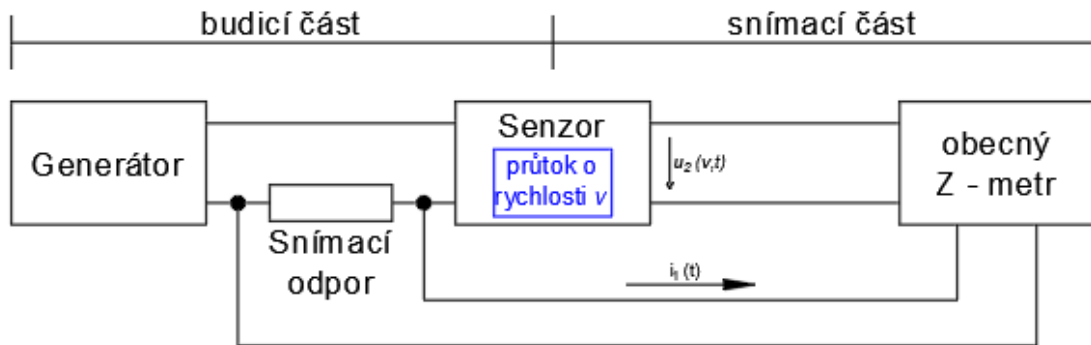
$$\omega_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{L(C_{N1,2} + C_L)}}, \quad (1.72)$$

kde  $C_{N1,2}$  představuje hodnotu kapacity pro dvě různá vyladění rezonančního obvodu.

Z takto získané soustavy dvou rovnic o dvou neznámých lze následně dopočítat hledané parametry  $L$  a  $C_L$ .

## 2 NÁVRH SENZORU

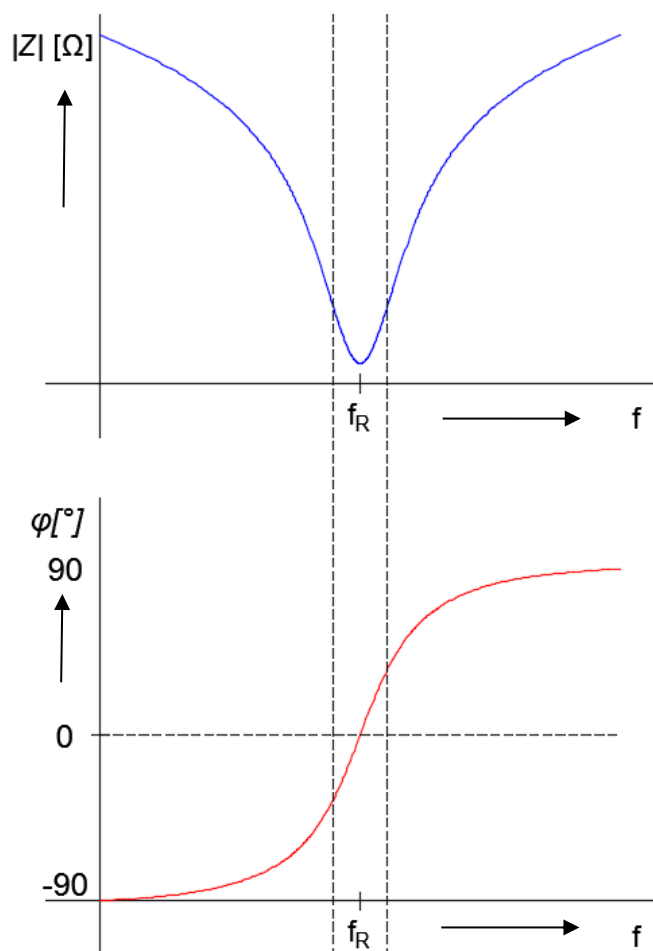
Navrhovaný senzor je koncipován jako rezonanční obvod a pomocí principu měření transimpedance  $Z$ , jak je naznačeno na blokovém schématu na obrázku Obr. 24 níže vyhodnocuje rychlost proudění kapaliny.



Obr. 24: Blokové schéma senzoru průtoku kapaliny

Senzor je rozdělen na tzv. budicí a snímací část. Jednotlivé části jsou podrobně popsány v následujícím textu.

Budicí část je koncipována jako sériový rezonanční obvod (dále SRO), který obsahuje prvky – cívku  $L$  (v náhradním modelu ve složení se sériovým odporem  $R_S$  a kapacitou  $C_P$ ) a kondenzátor  $C_R$ . SRO pracuje na svém rezonančním kmitočtu  $f_{rez}$ . Na obrázku Obr. 25 je znázorněna frekvenční závislost modulu a fáze impedance obecného SRO.



Obr. 25: Frekvenční závislost modulu a fáze impedance  $\underline{Z}$  obecného SRO

Z obrázku Obr. 25 je patrné, že pokud SRO pracuje na svém rezonančním kmitočtu, je změna modulu impedance při změně parametrů modelu obvodu relativně malá a není lineární. Z tohoto důvodu není vhodné analyzovat modul změřené transimpedance  $Z_{\text{mod}}$  jako veličinu závislou na okamžité hodnotě rychlosti proudění v média, nýbrž její fázovou složku -  $Z_{\varphi}$ . Při pohledu na fázovou charakteristiku navrženého uspořádání senzoru, obr.25, je patrné, že v oblasti rezonančního kmitočtu  $f_R$  je její průběh blízký lineárnímu - přímce, kterou by bylo možno tento průběh aproximovat. Změna fáze má velkou hodnotu směrnice (při malé změně frekvence dosahuje velké změny fáze-elektrické napětí), tudíž je možno analyzovat i velmi malé změny této fáze v závislosti na rychlosti proudění média  $v$ .

Hodnota transimpedance  $Z$  je tedy rovna

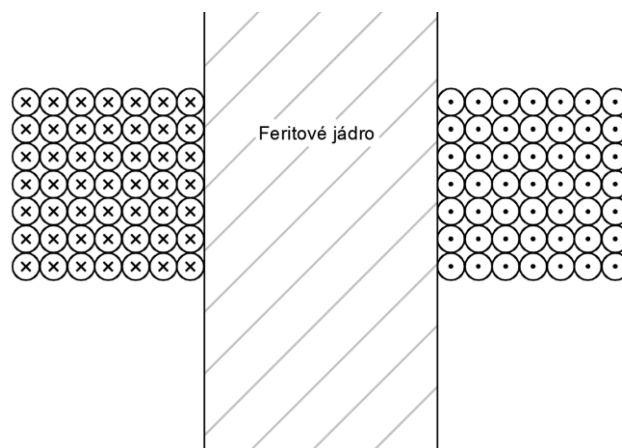
$$Z(v, t) = \frac{u_2(v, t)}{i_1(t)}. \quad (2.1)$$

## 2.1 Budicí část

Budicí část senzoru je složena ze sériového rezonančního obvodu a generátoru střídavého napětí.

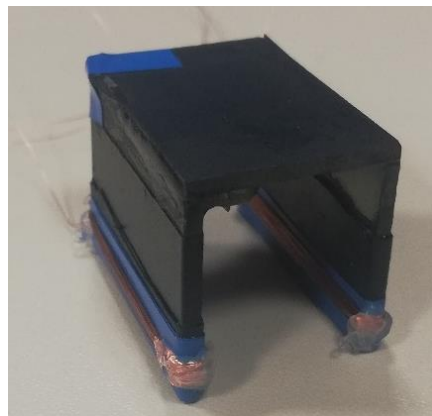
Aby bylo možné určit základní elektrické parametry modelu senzoru, je nutné pro jeho vytvoření provést měření a z něj určit prvky soustředěných parametrů. Bylo provedeno zkušební navinutí cívek a realizace magnetického obvodu, pomocí kterého byla zjištěna hodnota AL konstanty daného uspořádání cívky.

Na feritové jádro o rozměrech, které jsou uvedeny na výkresu v příloze A.1, bylo zkušebně navinuto 2x50 závitů, aby bylo možné měřením a následným vyhodnocením stanovit AL konstantu takto vzniklé cívky. Na každou stranu feritového jádra bylo navinuto 50 závitů, obě cívky byly analyzovány samostatně. Pro navinutí cívky byl použit Cu drát o průměru 0,1 mm se smaltovanou izolací. Závity byly vinuty tak, aby byl průřez cívky čtvercový. Schéma uspořádání cívky v magnetickém obvodu je naznačen na obrázku Obr. 26.



Obr. 26: Příklad vinutí zkušební cívky

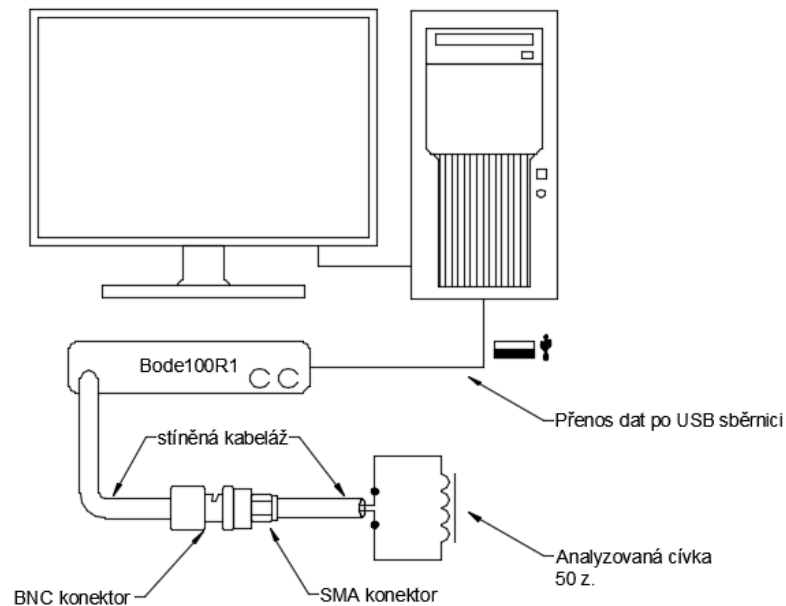
Výsledná zkušební cívka pak má podobu na obrázku Obr. 27.



Obr. 27: Analyzovaná zkušební cívka, magnetický obvod senzoru



Ke zjištění parametrů navinuté cívky byl využit analyzátor BODE 100 R1 a jeho obslužný SW Bode Analyzer Suite. Schéma měřicího pracoviště je na obrázku Obr. 28.



Obr. 28: Schéma měřicího pracoviště – určení  $A_1$  konstanty magnetického materiálu jádra

Postup měření byl následující:

1. Po teplotní stabilizaci analyzátoru BODE 100 R1 (sériové číslo EK337C) byla provedena kalibrace přístroje
2. Pomocí analyzátoru BODE a obslužného SW BODE Analyzer Suite byly analyzovány vlastnosti obou navinutých cívek v rozmezí kmitočtů  $f$  od 10 Hz do 10 MHz
3. Naměřené hodnoty (reálná část, imaginární část, modul impedance a fáze) byly zpracovány

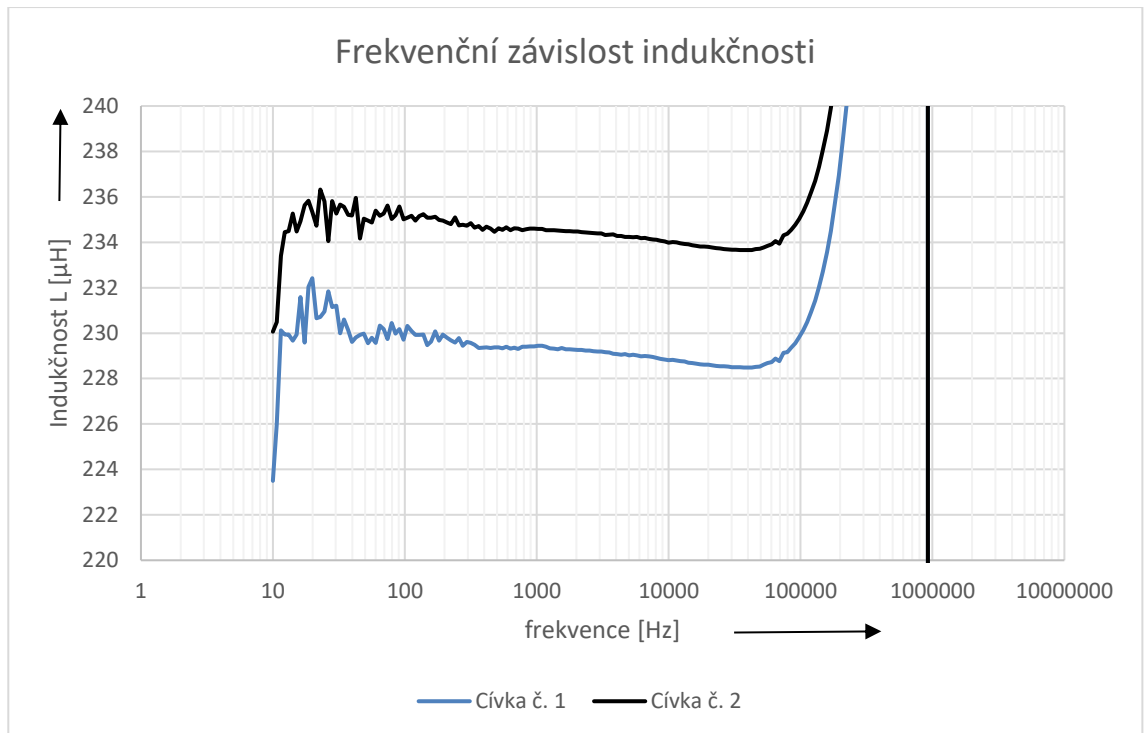
Na závislostech znázorněných na obrázku Obr. 29 jsou frekvenční závislosti, podle vztahu (1.66) jsou vypočteny indukce obou zkušebních cívek. Kompletní výsledky měření a příslušné výpočty jsou v příloze B.1

Vzor výpočtu indukce  $L$  pro  $f=104712,85$  Hz (naměřená hodnota  $X=151,412$ )

$$L = \frac{X}{2\pi f}$$

$$L = \frac{151,412}{2\pi 104712,85} \quad (2.2)$$

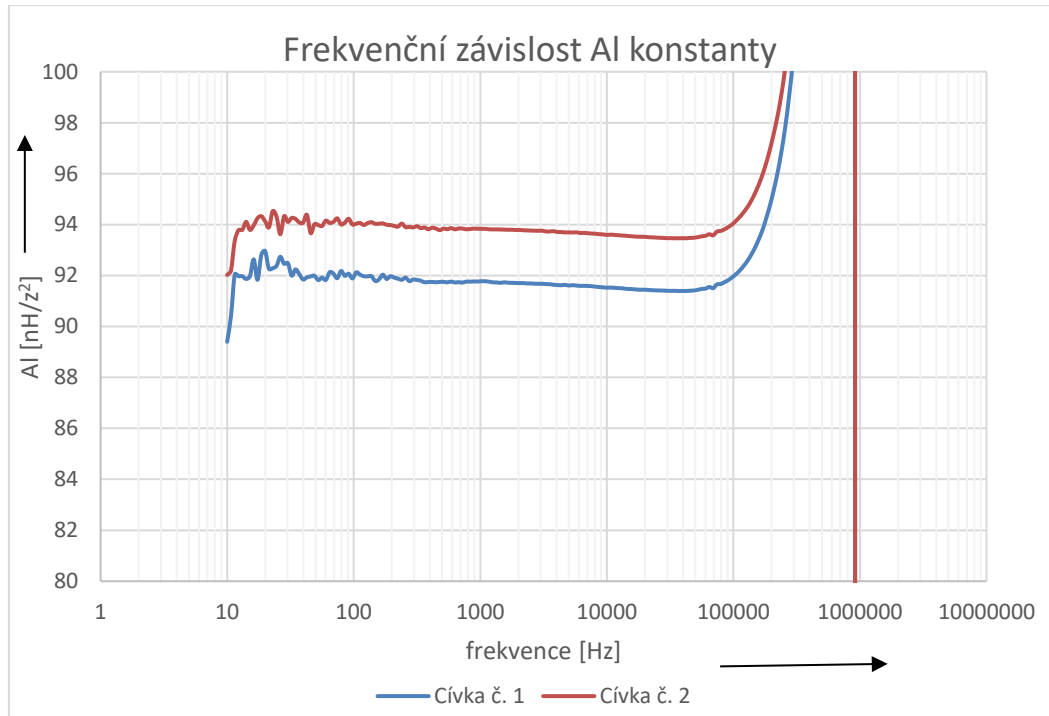
$$L = 230,134 \cdot 10^{-6} H$$



Obr. 29: Frekvenční závislost indukčnosti magnetického obvodu senzoru

Z naměřených frekvenčních závislostí (Obr. 29) je patrné, že cívka má stabilní vlastnosti v rozsahu od  $f_{\min}=100\text{Hz}$  do hodnoty  $f_{\max}=100\text{ kHz}$ , se zvyšující frekvencí indukčnost prudce roste. Vlastní rezonanční kmitočet navinuté cívky je z naměřených hodnot přibližně  $f_{rc}=900\text{ kHz}$ .

Z naměřených hodnot lze podle vztahu (1.67) získat hodnoty  $A_l$  konstanty navrhovaného magnetického obvodu senzoru průtokoměru. Tyto hodnoty jsou znázorněny v grafické závislosti na obrázku Obr. 30.



Obr. 30: Frekvenční závislost Al konstanty navrhovaného magnetického obvodu průtokoměru

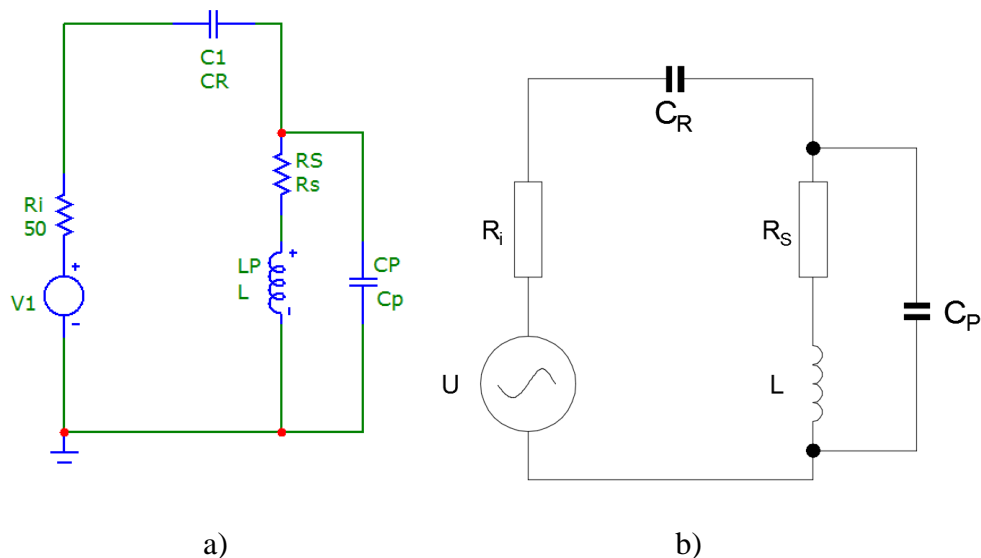
Vzor výpočtu Al konstanty pro  $f=104721,85$  Hz:

$$Al = \frac{L}{n^2}$$

$$Al = \frac{230,134}{50^2} \quad (2.3)$$

$$Al = 92,054 \frac{nH}{z^2}$$

Na základě naměřených a vypočtených hodnot (2.2-2.3) byl v simulačním software Micro – Cap 12 navržen a kalibrován numerický model budící části senzoru. Jeho schéma je zobrazeno na obrázku Obr. 31.



Obr. 31: Schéma a) počítačového modelu, b) schéma obvodového modelu

Model se skládá z následujících částí:

- Generátor střídavého napětí V1 ( $U=10$  V)
- Rezistor  $R=50$   $\Omega$ , který představuje hodnotu vnitřního odporu generátoru,
- Kondenzátor  $C_1$ , který slouží k doladění rezonance v elektrickém obvodu, a to tak, aby cívkou tekla maximální elektrický proud
- Induktor  $L$ , který představuje parametr samotné ideální cívky,
- Odpor  $R_S$ , který představuje odpor vinutí cívky
- Kondenzátor  $C_P$ , který představuje kapacity mezi jednotlivými závity cívky.

Výše zmíněné části modelu jsou v obvodovém simulátoru popsány následovně:

```
.DEFINE N 100 //definuje počet závitů n = 100
.DEFINE FR 100k //definuje požadovaný rezonanční
// kmitočet obvodu
.DEFINE AL1 90 //definuje hodnotu Al konstanty
.DEFINE LP {AL1*1e-9*N*N} //definuje hodnotu indukčnosti cívky
// L1
.DEFINE CP 3.6E-12*N //definuje hodnotu parazitní
// kapacity Cp
.DEFINE RS {(4*0.018*1e-6*0.08*N)/(pi()*D*D)} //definuje hodnotu
// odporu vinutí cívky
.DEFINE CR {1/(LP*FR^2*4*pi()*^2)} // definuje hodnotu kondenzátoru C1,
// aby byl obvod v rezonanci
```

Ve vytvořeném numerickém modelu je počítáno s hodnotou Al konstanty 90. Indukčnost cívky  $L$  je pak dle upraveného vztahu (1.67) dána závislostí

$$L = Al \cdot n^2. \quad (2.4)$$

Odpor vinutí  $R$  byl určen ze vztahu

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (2.5)$$

kde  $\rho$  představuje hodnotu měrného odporu použitého materiálu [ $\Omega\text{m}^{-1}$ ], (pro Cu  $\rho=0.01857 \mu\Omega\text{m}^{-1}$ ),

$l$  představuje celkovou délku vodiče ve vinutí [m],

$S$  představuje průřez plochy vodiče vinutí [ $\text{m}^2$ ].

Při délce jednoho závitu  $l_{1z}=8$  cm je pak velikost odporu vinutí v závislosti na počtu závitů a velikosti průřezu vodiče rovna:

$$R = \frac{\rho \cdot l_{1z} \cdot n}{\frac{\pi d^2}{4}}, \quad (2.6)$$

$$R = \frac{4 \cdot 0,018 \cdot 10^{-6} \cdot 0,08 \cdot n}{\pi d^2},$$

Hodnota kondenzátoru  $C_1$  vychází z Thomsonova vztahu, který popisuje závislost rezonančního kmitočtu na indukčnosti a kapacitě.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}}, \quad (2.7)$$

$$C_1 = \frac{1}{4\pi^2 L f_0^2}$$

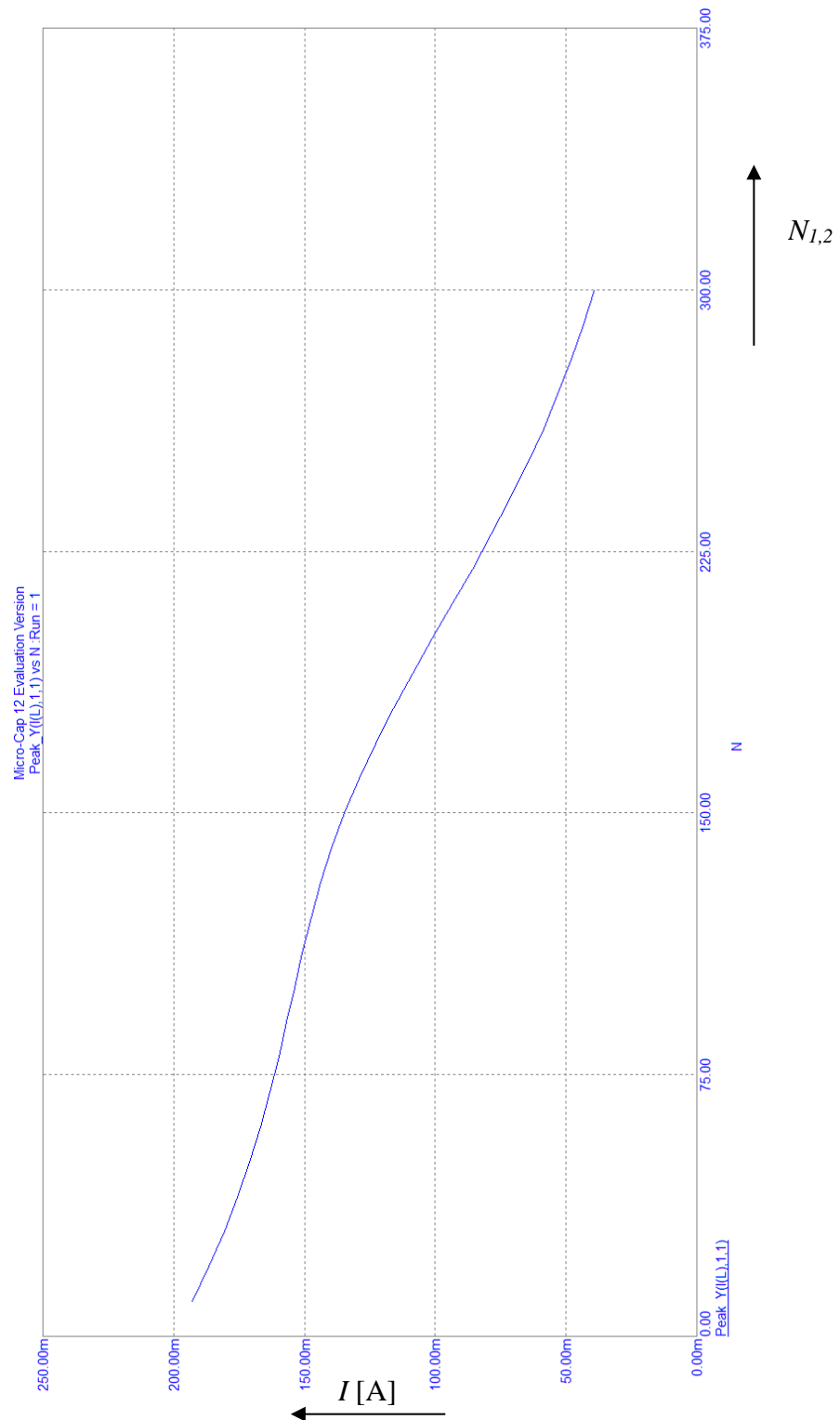
Takto se obvod dostává do stavu sériové rezonance a elektrický proud tekoucí do cívky dosahuje nejvyšších hodnot. Kapacita  $C_P$  je dána empiricky získaným vztahem [6].

$$C_P = n \cdot 3,6 \cdot 10^{-12}. \quad (2.8)$$

Průměr vodiče se smaltovanou izolací, ze kterého byla zkušební cívka zhotovena je  $\phi D_{Cu}=0.1$  mm, tento rozměr je použit i v počítačové simulaci.

Analýza obvodu zahrnovala následující kritéria. Hodnotil se maximální elektrický proud cívkou  $I_{\max,c}$  a maximální činný výkon  $P_{\text{out}}$  uvolněný cívkou. Proměnným faktorem byl pak počet závitů  $N_1, N_2$ . Kompletní výsledky analýzy získaných ze simulace jsou k dispozici v příloze B.2, číselné výsledky simulace jsou pak k uvedeny na příloženém datovém nosiči.

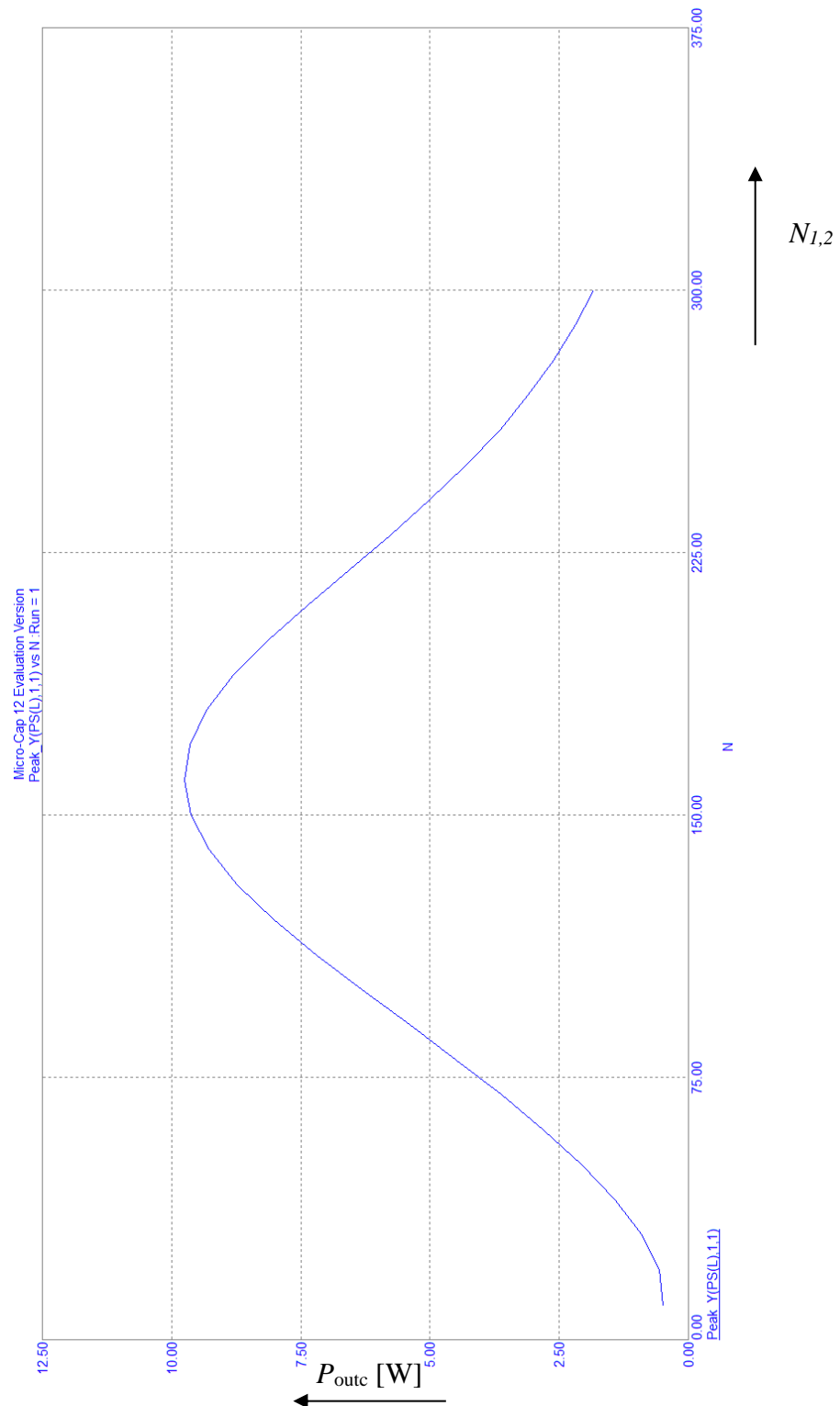
Na obrázku Obr. 32 je zobrazen výsledek analýzy modelu při hodnocení maximálního elektrického proudu cívkou pro různé počty závitů  $N_1, N_2$ .



Obr. 32: Výsledek simulace proudu cívkou  $I$  v závislosti na počtu závitů  $N_{1,2}$

Z analýzy je patrné, že vhodný počet závitů by byl  $N_{1,2}=10$ . Dalším parametrem je úvaha uvolněného tepla - činný výkon uvolněný na cívkách senzoru a závislost jejíž průběh je znázorněn na obrázku Obr. 33. Z grafického vyhodnocení plyne, že pro takto volený parametr je vhodný počet závitů  $N_{1,2}=160$ , rezonanční kmitočet pak klesne na  $f_{rez}=81$  kHz. V obou zobrazených závislostech na Obr. 32 a Obr. 33 jsou brány v úvahu

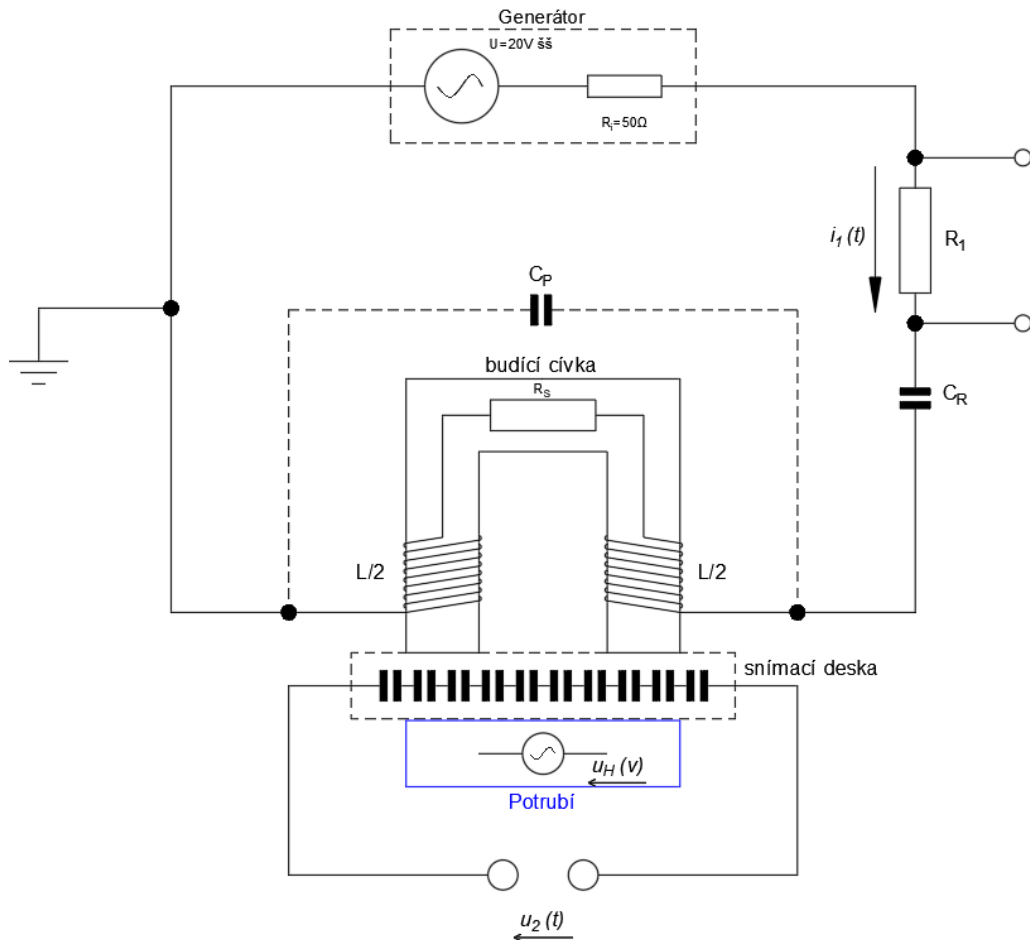
špičkové hodnoty veličin pro dané počty závitů. Tyto grafické závislosti byly získány pro výkonovou analýzu parametrů modelu.



Obr. 33: Výsledek simulace výkonu  $P_{\text{outc}}$  uvolněného na cívkách senzoru v závislosti na počtu závitů  $N_1, N_2$

### 2.1.1 Návrh budicí části senzoru

Na obrázku Obr. 34 je znázorněno blokové schéma navrženého senzoru.



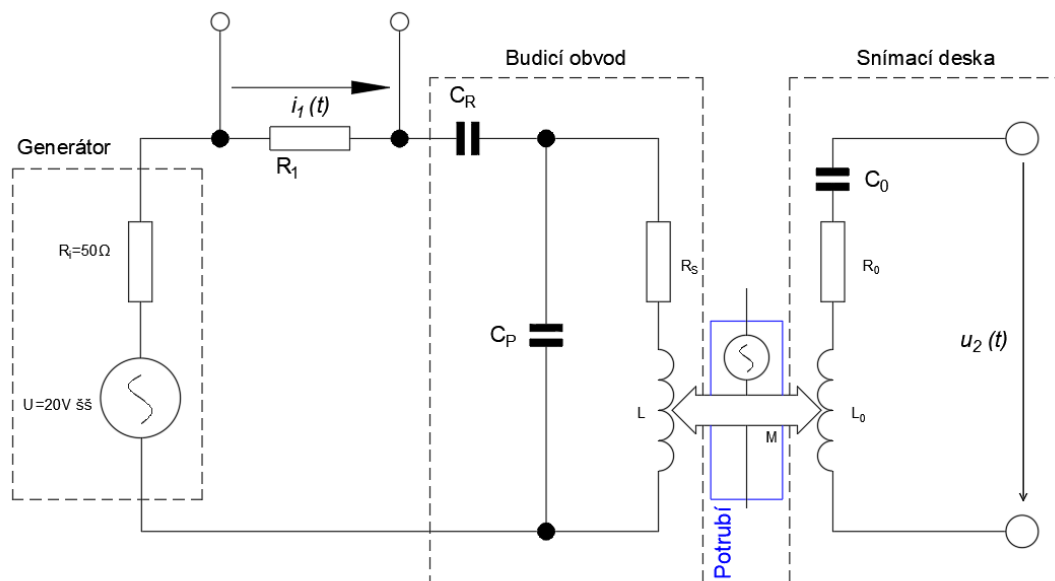
Obr. 34: Blokové schéma budicí části senzoru

Prvky  $L$ ,  $C_P$ ,  $C_R$  a  $R_S$  vytváří rezonanční obvod, který byl simulován v předchozí kapitole. Odpor  $R_1$  slouží ke snímání velikosti proudu  $i_1(t)$ . V měřicím potrubí protékaném „vodivou“ kapalinou rychlostí  $v$  pak následkem působení magnetické indukce  $B$  vyvolané cívkou  $L$  vzniká tzv. Hallovo napětí  $u_H(v)$ , které je závislé na rychlosti průtoku kapaliny  $v$  ústrojím o sířce  $d$ , tedy na rychlosti pohybu volných nosičů náboje.

$$U_H = vBd \quad (2.9)$$

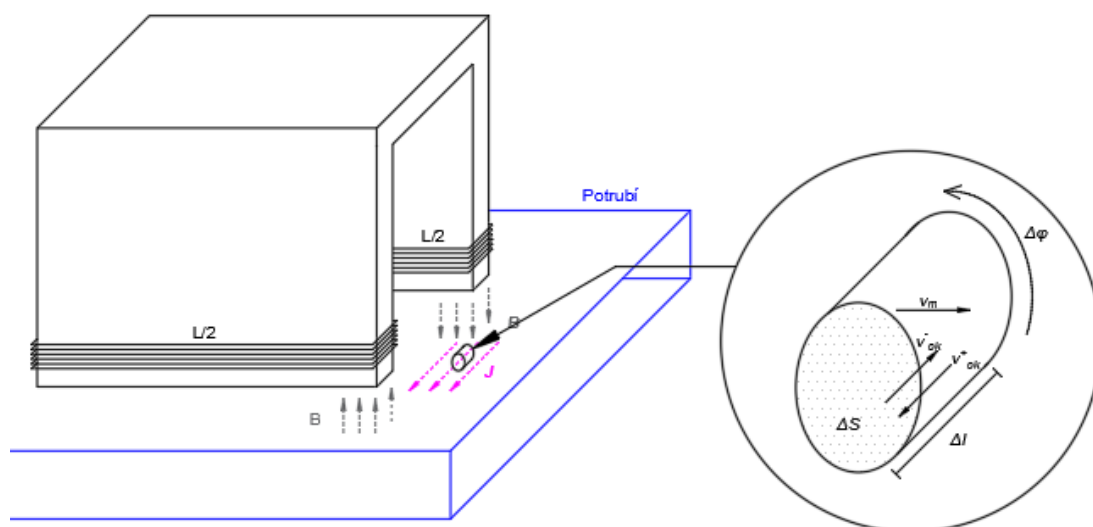
Dle náhradního schématu na obrázku Obr. 35. je mezi budicí a snímací částí pomocí cívk  $L$  navázána magnetická vazba vyjádřená vzájemnou indukčností  $M$ . Velikost průtoku vodivé kapaliny v měřicím potrubí přímo ovlivňuje parametry prostředí  $C_0$ ,  $R_0$ ,  $L_0$ , a rozladí tak rezonanční obvod ve snímací desce (elektrody pro snímání intenzity elektrického pole  $E$ ).





Obr. 35: Náhradní schéma budicí části senzoru

Na obrázku Obr. 36 je naznačen princip konfigurace a funkce navrženého senzoru průtokoměru.



Obr. 36: Princip funkce senzoru

Obecná impedance prostředí je dána vztahem

$$Z_V = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}}, \quad (2.10)$$

kde  $\mathbf{E}$  je vektor elektrické intenzity [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ],  
 $\mathbf{H}$  je vektor magnetické intenzity [ $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ ].

Jestliže platí, že obecná impedance z pohledu modelu se soustřednými parametry (2.1) je rovna

$$Z = \frac{U}{I}, \quad (2.11)$$

napětí  $U$  je pomocí upraveného vztahu (2.10) dáno vztahem

$$U = Z_v \cdot H, \quad (2.12)$$

elektrický proud pak vztahem

$$I = J \cdot \Delta S, \quad (2.13)$$

Při porovnání vztahů (2.10) a (2.11) a dosazením vztahů (2.12) a (2.13) je pak výsledná impedance elementu dána vztahem

$$Z = \frac{Z_v \cdot H \cdot \Delta \varphi}{J \cdot \Delta S}. \quad (2.14)$$

Návrhem jednotlivých částí budící části se zabývají následující text.

### 2.1.2 Návrh budící cívky

Cívka je navinuta ručně na feritovém jádře, jehož základní parametry jsou shrnuty v tabulce Tab. 3.

Tab. 3: Parametry feritového jádra

Parametr	Hodnota
relativní permeabilita $\mu_r$	1000
vlastní rezonanční kmitočet	1 MHz
střední délka závitů	0,08 m
Al konstanta	90 nH/z <sup>2</sup>

Jádro je slepeno ze tří částí, které dohromady tvoří prvek o průřezu ve tvaru písmene U. Kompletní rozměry jádra jsou k dispozici v příloze A.1. Na jádro bylo vzhledem k výsledku počítačové simulace navinuto 160 závitů. Indukčnost navinuté cívky je dána vztahem (1.67) a je rovna

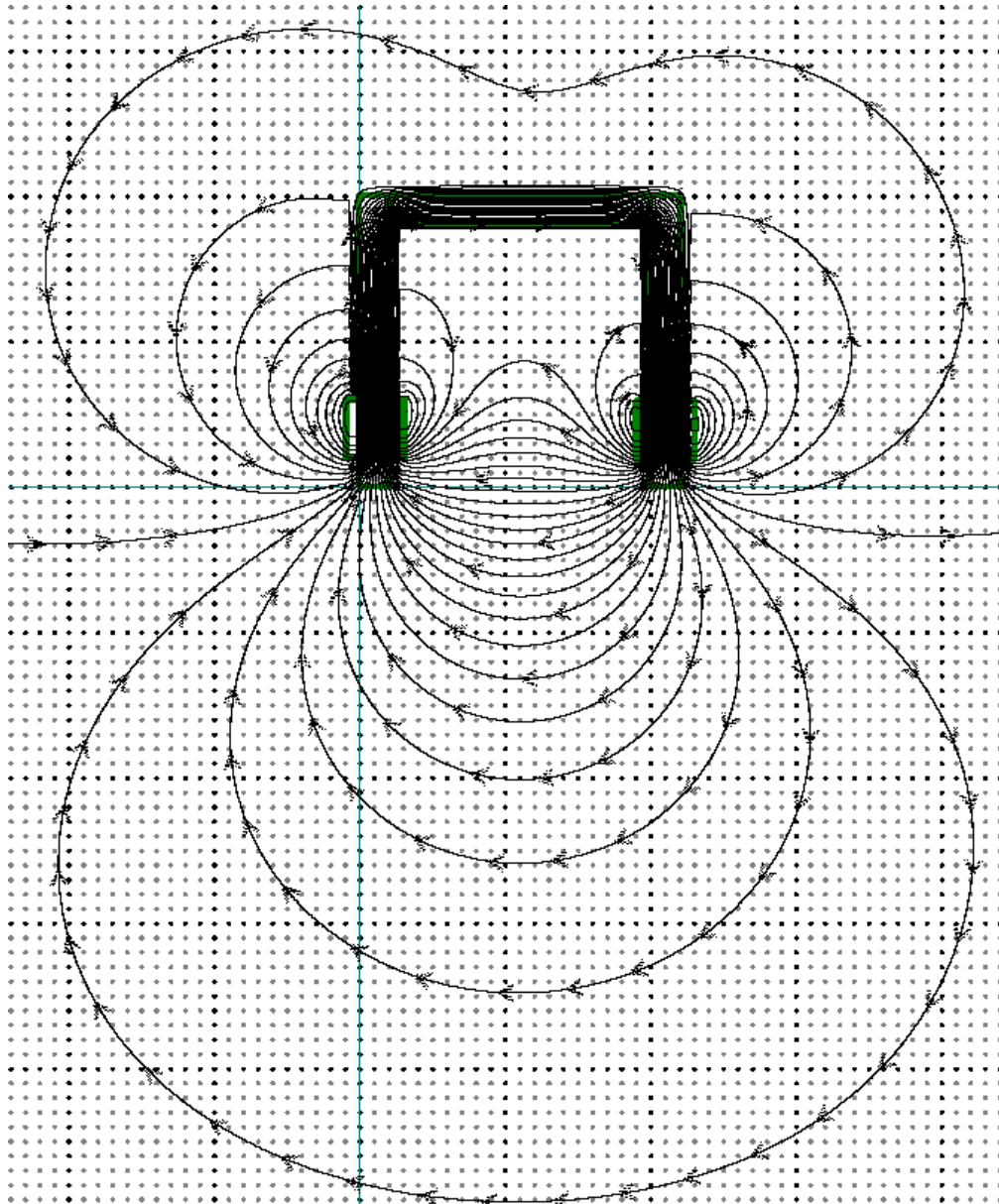
$$Al = \frac{L}{n^2},$$

$$L = Al \cdot n^2,$$

$$L = 90 \cdot 10^{-9} \cdot 160^2,$$

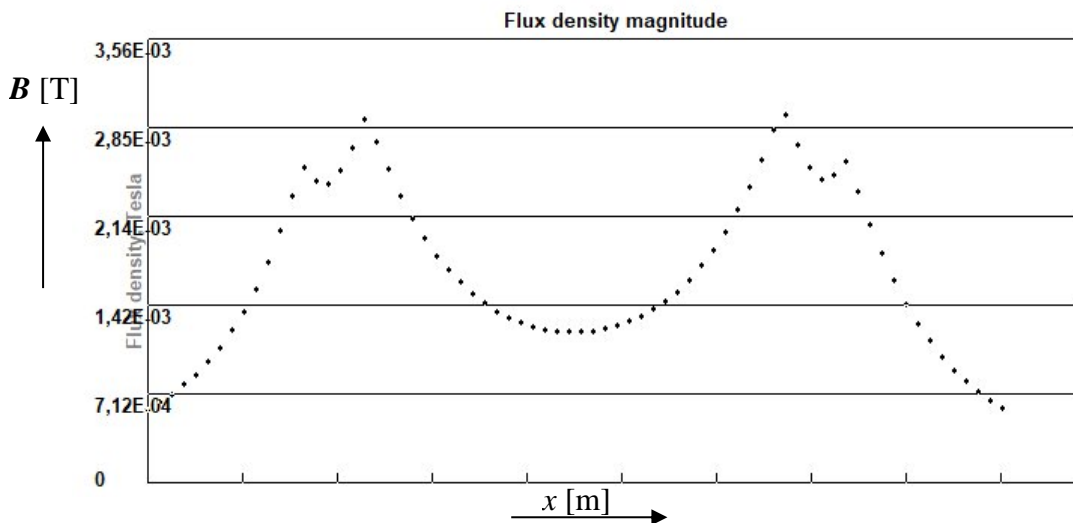
$$L = 2,304 \text{ mH}.$$

V simulačním SW Vizimag 3.19 byl vytvořen 2-D model cívky a byl analyzována magnetická indukce buzená proudem procházejícím cívkou. Výsledek simulace je znázorněn na obrázku Obr. 37, kde jsou zobrazeny jednotlivé siločáry magnetické indukce.

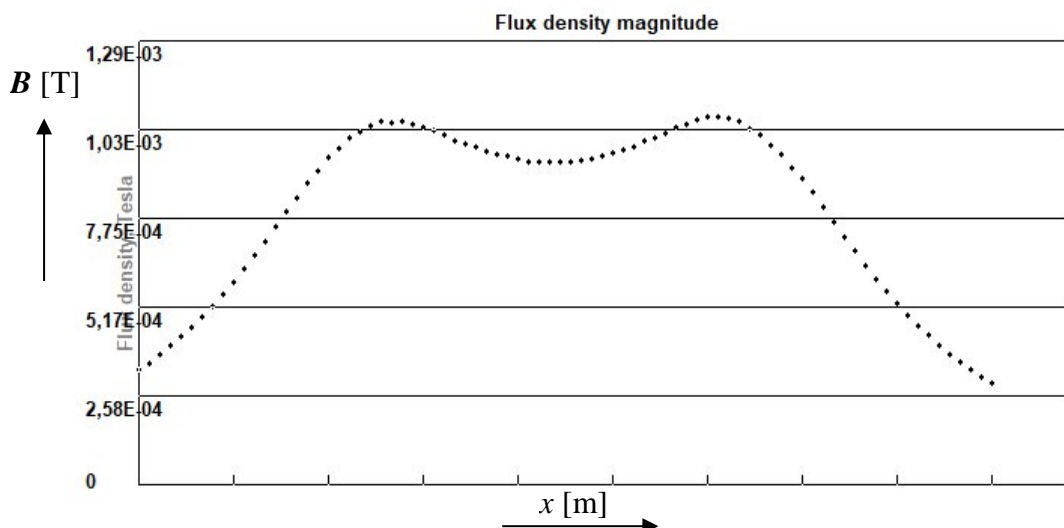


Obr. 37: Siločáry magnetického pole v okolí budící cívky analyzovaného numerického modelu

Na obrázcích Obr. 38 a Obr. 39 jsou znázorněny průběhy magnetické indukce ve vzdálenosti 1 mm a 5 mm od cívky, při buzení proudem 150 mA o frekvenci 81 kHz.



Obr. 38: Velikost měrného magnetického toku  $B$  ve vzdálenosti 1 mm od cívky



Obr. 39: Velikost měrného magnetického toku  $B$  ve vzdálenosti 5 mm od cívky

Z grafických závislostí na Obr. 38 a Obr. 39, je patrné, že hodnota magnetické indukce  $B$  dosahuje ve sledované oblasti hodnot v řádu  $B=10^{-3}$  T pro vzdálenost 1 mm a hodnoty  $B=10^{-4}$  T pro vzdálenost 5 mm. Tato hodnota měrného toku  $B$ , dle vztahu (2.15), vytváří magnetický indukční tok  $\Phi$

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad (2.15)$$

kde  $B$  představuje modul měrného magnetického toku [T],  
 $S$  představuje plochu [m<sup>2</sup>],  
 $\alpha$  představuje úhel, který svírají siločáry s plochou [°].

Pokud uvažujeme plochu kolmé siločáry magnetického pole na snímací desku, plochu  $S$  v řádu  $\text{cm}^2$  (plocha snímače má přibližně  $20 \text{ cm}^2$ ) a magnetickou indukci v řádu  $\text{mT}$ , bude hodnota magnetického toku přibližně

$$\begin{aligned}\Phi &\sim B \cdot S \\ \Phi &\sim 10^{-3} \cdot 10^{-3} \\ \Phi &\sim 10^{-6} \text{ Wb}\end{aligned}$$

Časově proměnný magnetický indukční tok o této hodnotě pak indukuje napětí o velikosti

$$U = \frac{\Phi}{\Delta t}, \quad (2.16)$$

kde  $\Delta t$  představuje časový úsek změny magnetického indukčního toku.

Pokud uvažujeme simulovanou hodnotu frekvence budicího signálu  $f = 81 \text{ kHz}$ , je hodnota tohoto časového úseku rovna

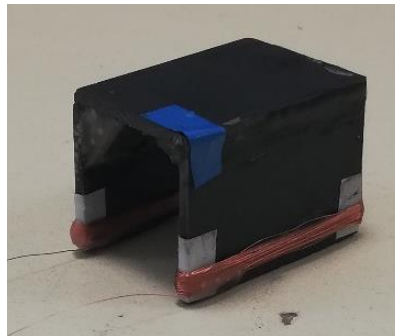
$$\begin{aligned}t &= \frac{1}{f}, \\ t &= \frac{1}{81 \cdot 10^3}, \\ t &\sim 10^{-5}.\end{aligned} \quad (2.17)$$

Přibližná velikost indukovaného napětí  $U$  bude

$$U \sim \frac{10^{-6}}{10^{-5}}, \quad (2.18)$$

tedy přibližně v řádu desítek až stovek  $\text{mV}$ .

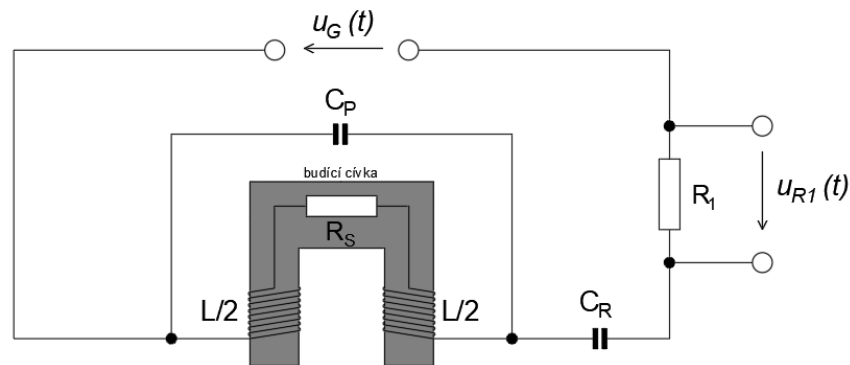
Na obrázku Obr. 40 je fotografie již navinuté cívky.



Obr. 40: Navinutá budicí cívka uvažovaného modelu průtokoměru

### 2.1.3 Návrh rezonančního obvodu

Navržený rezonanční obvod má schéma znázorněné na obrázku Obr. 41.



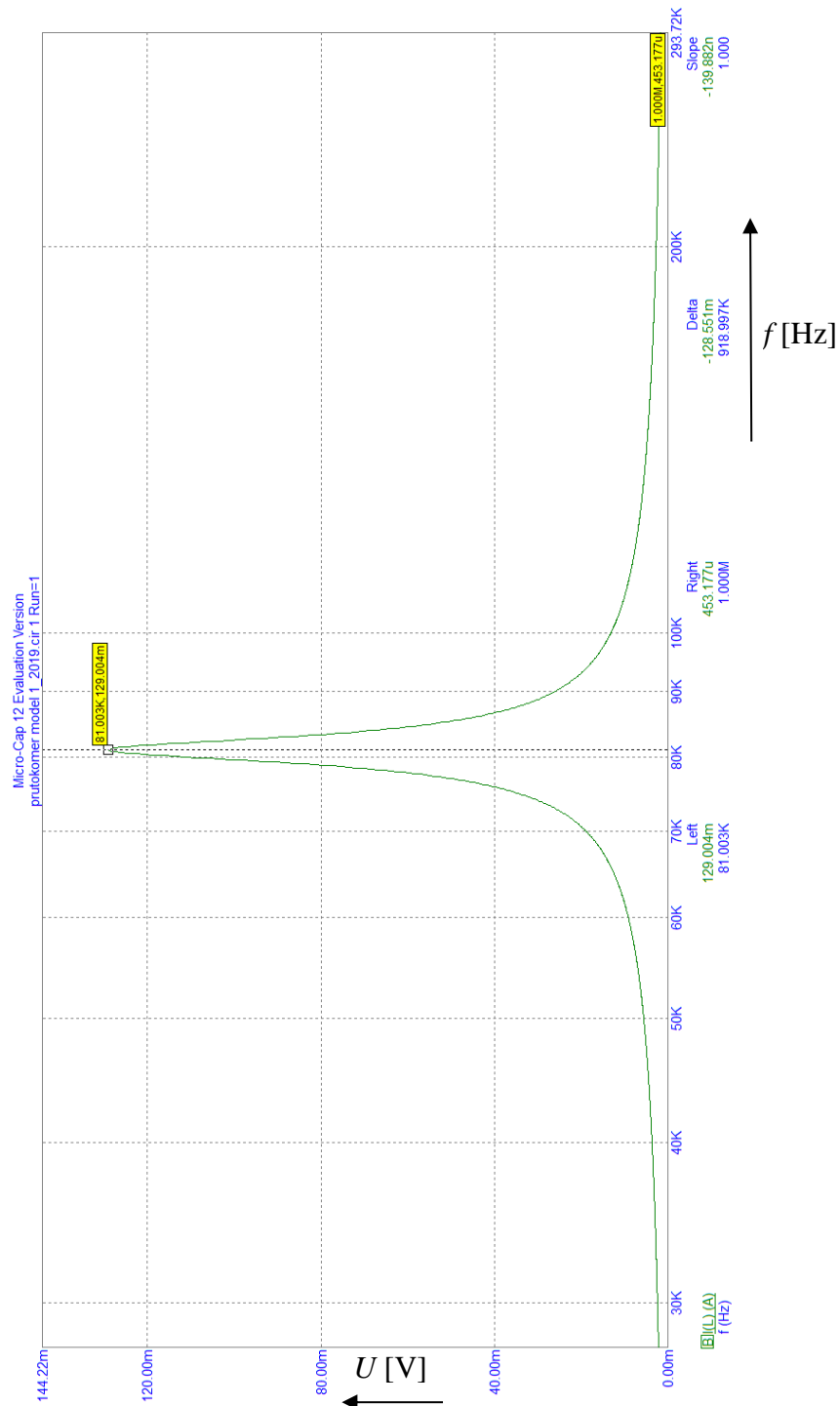
Obr. 41: Schéma rezonančního obvodu

Obvod byl simulován v prostředí Micro-Cap (kapitola 2.1.1) a na základě výsledku modelování byly stanoveny následující parametry jednotlivých prvků:

Tab. 4: Parametry jednotlivých prvků v obvodu

Prvek	Výsledek simulace
cívka $L$	2,3 mH
kondenzátor $C_R$	1,099 nF
parazitní kapacita $C_P$	576 pF
Odpor vinutí cívky $R_s$	29,3 $\Omega$
Snímací odpor $R_1$	1 $\Omega$

Dle výsledku simulace je elektrické napětí  $U$  pro rezonanční kmitočet takto vytvořeného obvodu roven  $f_R = 81$  kHz. Průběh frekvenční charakteristiky je na obrázku Obr. 42.



Obr. 42: Frekvenční závislost sériového rezonančního obvodu – výsledek simulace

Budicí obvod byl navržen na desku plošného spoje tak, aby vedení se blížilo impedančnímu přizpůsobení generátoru, tedy na hodnotu  $Z_g=50 \Omega$ . Hodnoty jednotlivých prvků obvodu, včetně návrhu DPS jsou v kompletním schématu v příloze A.2. Pro připojení ke generátoru napětí slouží SMA konektor, stejně jako pro proud  $i_l(t)$ , který je snímán na rezistoru  $R_1$  a získaný signál je následně přiveden na vstup osciloskopu.

## 2.2 Snímací část

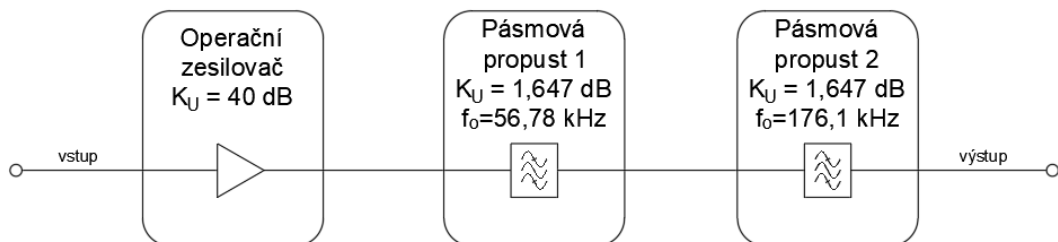
Snímací část senzoru se skládá ze snímací desky a samostatného zesilovače napětí indukovaného na snímací desce. Proto, aby bylo možné vhodně snímat a vyhodnocovat transimpedanci  $Z$  (2.1), je nutné u snímací části ze senzoru elektrické napětí impedančně oddělit a zesílit. Vstup zesilovače by měl mít impedanci  $Z_{in,Am}$  v řádech  $100\text{G}\Omega$  a vyšší, proto, aby nezkreslil snímané elektrické napětí výstupu senzoru snímací částí průtokoměru.

### 2.2.1 Snímací deska

Snímací deska bude vložena mezi budicí cívku a měřicí trubici. Je koncipována jako 26 sériově řazených elektrod, které jsou vyleptány na desku plošného spoje. Elektrody jsou rozmístěny tak, aby se jednotlivá, na nich indukovaná, napětí sčítala a ve výsledku tak bylo dosaženo co největšího indukovaného napětí. Při návrhu rozmístění jsou respektovány rozměry budicí cívky.

### 2.2.2 Zesilovač napětí a aktivní filtr

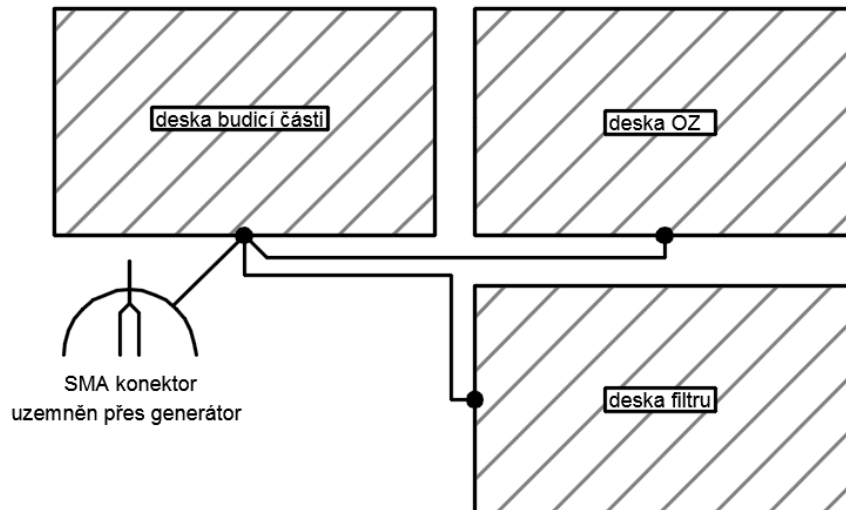
Blokové schéma zesilovače a aktivního filtru je znázorněno na obrázku Obr. 43. Vstupní svorky jsou přivedeny na výstup snímací desky senzoru průtokoměru, dále dochází k dalšímu zpracování získaného napěťového signálu.



Obr. 43: Blokové schéma zesilovače a filtru

Vzhledem k nízké úrovni vstupního signálu je nutné zohlednit řádné odrušení desek plošných spojů, aby nedocházelo k dodatečnému rušení snímaného signálu. Blokové schéma je znázorněno na blokovém schématu na Obr. 44.





Obr. 44: Blokové schéma vztažných elektrod a stínění

### 2.2.2.1 Návrh obvodu operačního zesilovače

Zesilovač slouží jak k impedančnímu oddělení snímaného signálu od měřicího zařízení, tak k zesílení snímaného napěťového signálu (elektrická intenzita  $E$ ), který je indukovan na snímací desce. Kompletní schéma zapojení zesilovače, včetně hodnot jednotlivých součástek a návrhu desek plošných spojů, je podrobně popsáno v příloze A.3. Vzhledem k původní úrovni zesilovaného signálu byl zvolen operační zesilovač s velkým vstupním odporem (v řádu  $T\Omega$ ), minimálním posunem nuly, minimální napěťovou vstupní nesymetrií, vstupní proudovou nesymetrií a minimálním vlastním šumem. Těmto požadavkům vyhovuje operační zesilovač OPA 129 od výrobce Texas Instruments, dále označovaného jako OZ1. Jeho základní parametry jsou naznačeny v tabulce Tab. 5 níže.

Tab. 5: Přehled základních parametrů OZ OPA 129 [16]

Parametr	Hodnota
vstupní odpor	10 T $\Omega$
napájení	$\pm 15$ V
vstupní napěťová nesymetrie	0,5 mV
šumové napětí (pro $f=100$ kHz)	15 nV / Hz <sup>-1/2</sup>
vstupní offset proudu	30 fA

OZ je napájen pomocí lithium polymerových baterií, aby se do obvodu nezačala nežádoucí dodatečná rušení produkovaná zdroji elektrického napětí učená k napájení aktivních prvků. Baterie 14,8 V/1500 mAh jsou připojeny na vstupní svorkovnici B, přičemž jsou řazeny sériově za sebou. Pro připojení napájení k obvodu poté slouží rozpojovací pole R, které je tvořeno konektorem Molex Milli-Grid. Na desce OZ slouží pro připojení OZ1 pouzdro DIL8, přičemž samotný OZ1 (v provedení SOIC) je umístěn na redukci SOIC-DIL8, jejíž deska plošných spojů je taktéž součástí přílohy A.3. Mezi kladnou a zápornou svorku napájení jsou pak připojeny blokovací kondenzátory 100 nF

a  $10\mu\text{F} / 25\text{V}$ , přičemž jejich umístění bylo zvoleno tak, aby byly fyzicky co nejbližší samotným svorkám OZ1. Dle [16] jsou svorky OZ1 - NC1, NC2 a GND propojeny, zároveň je na desce plošných spojů vedena kolem vstupních svorek smyčka aktivního stínění. Nevyužitá plocha desky plošných spojů je připojena ke stínění - referenčnímu potenciálu.

Vzhledem jak k očekávané úrovni vstupního signálu, tak ke kmitočtu vstupního signálu bylo zvoleno, zesílení signálu na  $A = 10$ . Dle datasheetu [16] použitého OZ je tato hodnota pro daný kmitočet maximální. Navržené hodnoty prvků obvodu OZ jsou tedy  $R_2 = 1\text{ k}\Omega$  a  $R_1 = 100\ \Omega$ . Celkové zesílení bude tedy dle vztahu

$$\begin{aligned}
 A &= 1 + \frac{R_2}{R_1}, \\
 A &= 1 + \frac{1000}{100}, \\
 A &= 1 + 10, \\
 A &= 11.
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

### 2.2.2.2 Návrh kmitočtového filtru

Navržený obvod bude pracovat na frekvenci  $f=81\text{ kHz}$ . K omezení vlivům na snímání signál je do obvodu zařazen kmitočtový filtr, jehož meze jsou uvedeny v tabulce Tab. 6 níže. Jedná se o filtr typu dolní propust.

Tab. 6: Požadované parametry filtru

Parametr	Hodnota
dolní mez nepropustného pásma $f_{p1}$	5 kHz
dolní mez propustného pásma $f_{m1}$	50 kHz
horní mez propustného pásma $f_{m2}$	200 kHz
horní mez nepropustného pásma $f_{p2}$	2 MHz
Minimální útlum v nepropustném pásmu	40 dB
Maximální útlum v propustném pásmu	3 dB

Tyto hodnoty byly zvoleny v zájmu co nejvyššího potlačení okolních frekvencí a násobků síťové frekvence (50Hz). Frekvenční pásmo dlouhých vln je dle [17] silně zarušeno vlivy shrnutými v tabulce

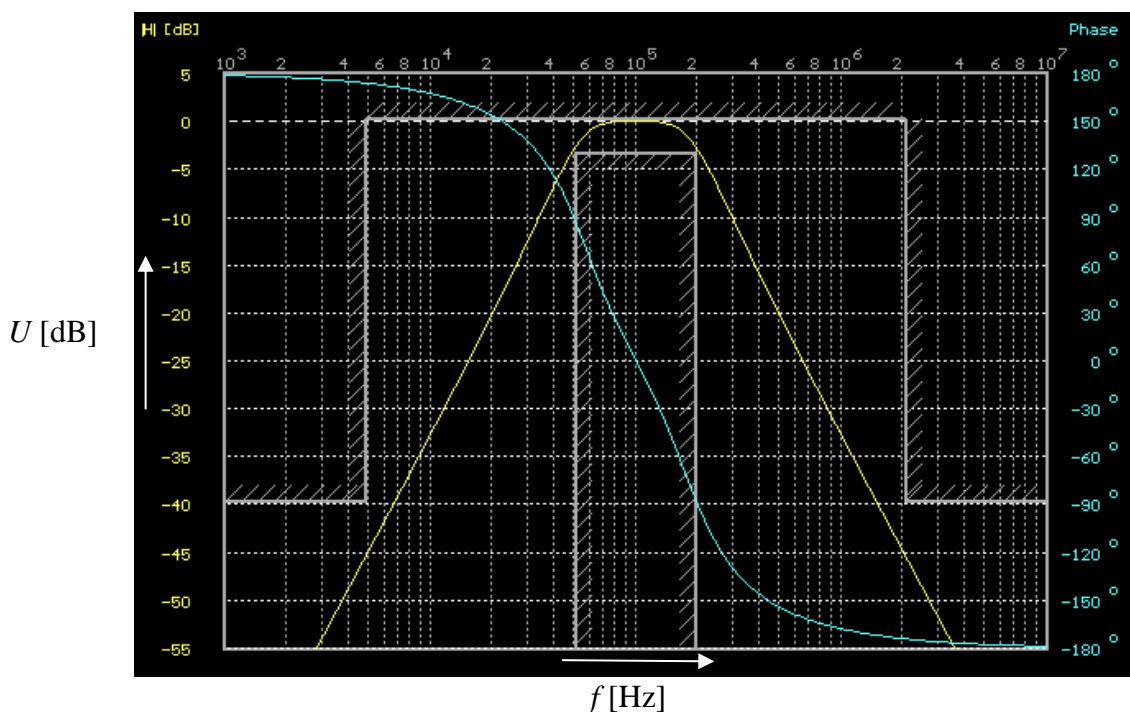
Tab. 7. Sledováno je pásmo od 5 kHz do 2 MHz.

Tab. 7: Využití rádiového spektra

Aplikace	Pásmo
SRD (short range device)	5 - 2000 kHz
Lékařské implantáty	5 - 315 kHz
Necivilní využití	14 - 19,95 kHz
DCF 77 signál	72 - 84 kHz
Necivilní využití	90 - 112 kHz
	117,6 - 126 kHz
	129 - 135,7 kHz
Amatérské vysílání	135,7 - 137,8 kHz
Rozhlas AM	148,5 - 255 kHz
Letecké radiomajáky	255 - 526,5 kHz
Necivilní využití	255 - 1300 kHz
Rozhlas AM	526,5 - 1606,5 kHz
Amatérské vysílání	1715 - 2000 kHz
Necivilní využití	1606,5 - 2025 kHz

Je patrné, že sledované pásmo je silně využíváno a očekává se že i provozováno, proto je nutné navrhnout filtr takový, aby byly dopady okolních zdrojů elektromagnetických vln na měřený signál minimalizovány.

V návrhovém SW NAF Filter Designer byl proto navržen aktivní filtr, jehož frekvenční a fázová charakteristika je na obrázku Obr. 45.

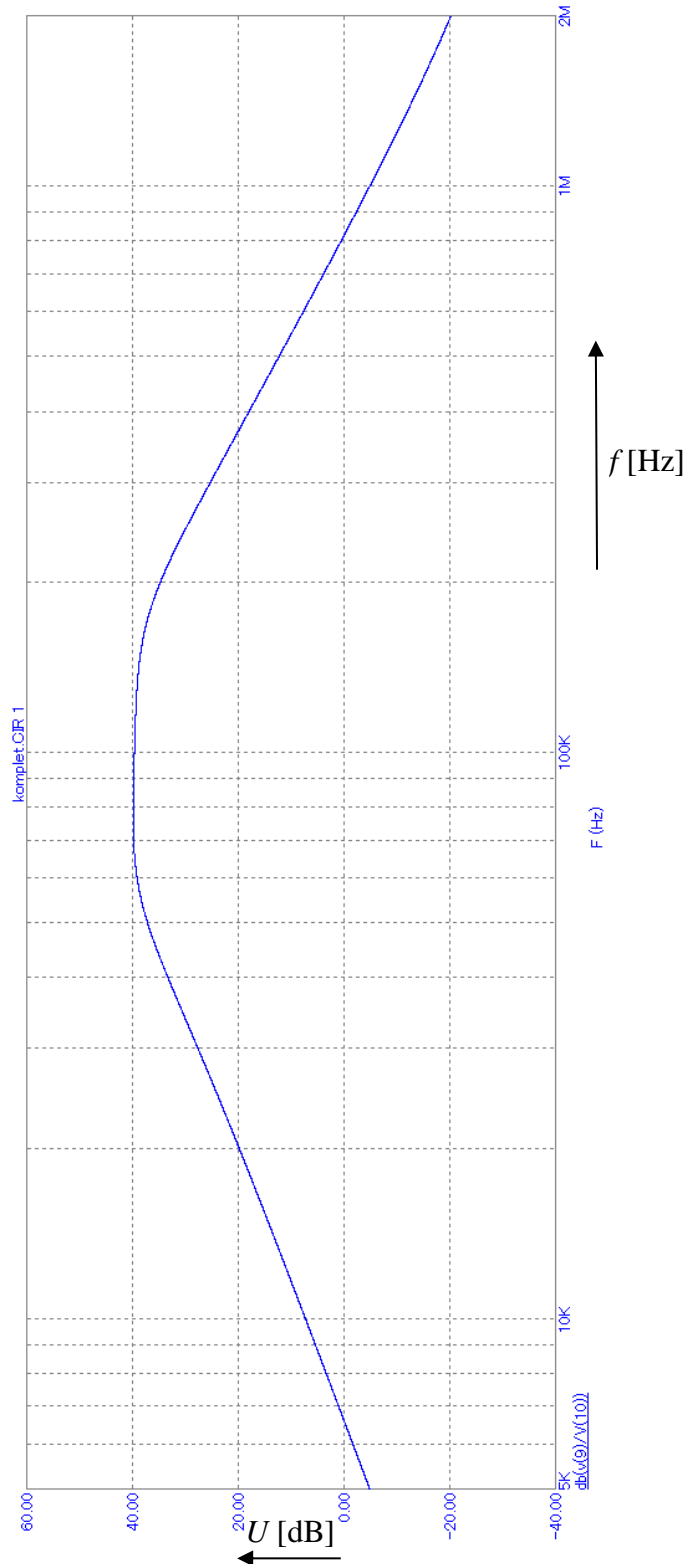


Obr. 45: Frekvenční a fázová charakteristika navrženého filtru

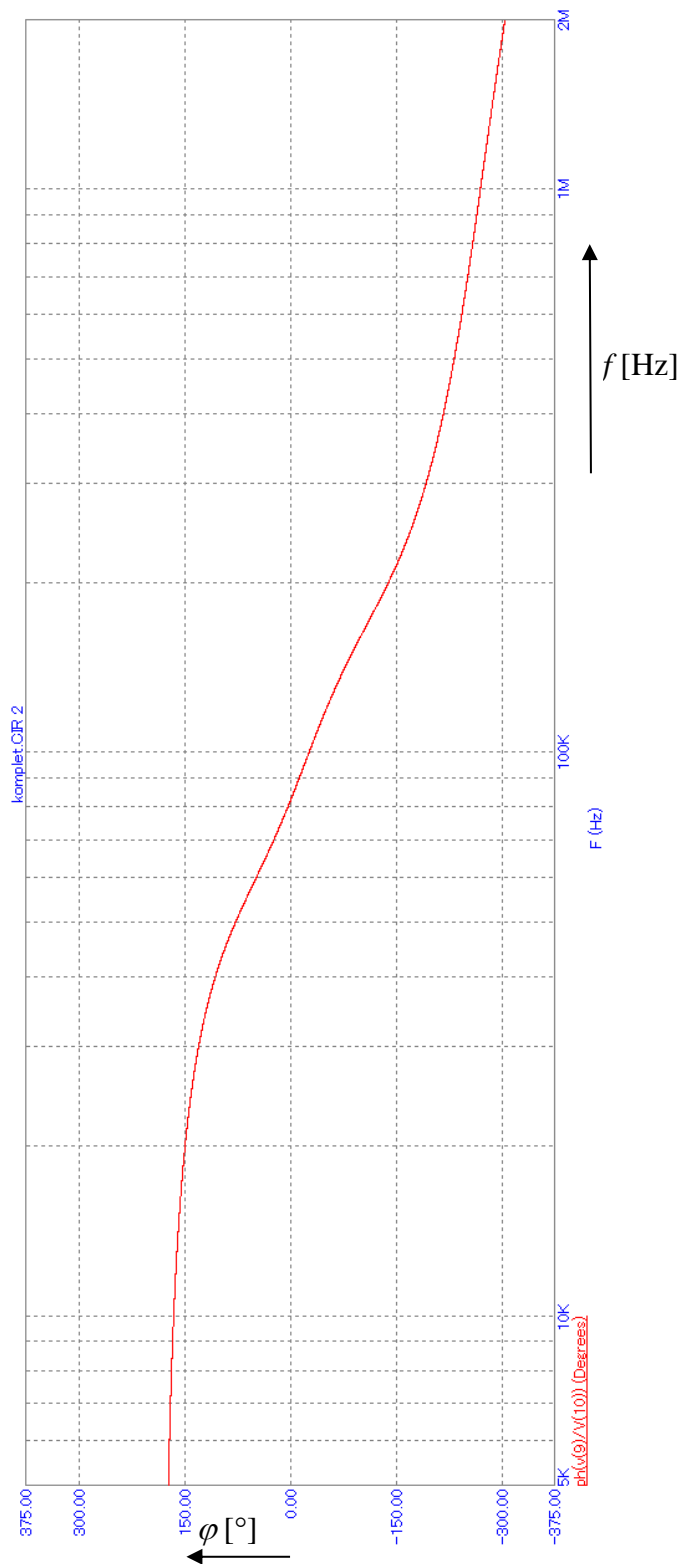
Filtr je navržen pomocí metody kaskádní syntézy, pro svůj vhodný průběh byla využita Buttworthova aproximace. Schéma, včetně soupisu součástek a návrhu desky

plošných spojů, je k dispozici v příloze A.4.

V simulačním SW Micro-Cap byl vytvořen model snímací části senzoru. Jeho frekvenční a fázová charakteristika je znázorněna na Obr. 46 a Obr. 47, kompletní model je k dispozici na přiloženém datovém nosiči.



Obr. 46: Frekvenční charakteristika snímací části průtokoměru



Obr. 47: Fázová charakteristika snímací části průtokoměru

Z fázové charakteristiky (sledované fázový posun napětí  $\varphi$ ) je patrné, že v okolí rezonančního kmitočtu  $f_r$  sestavy senzoru je její průběh blízký lineárnímu.

## 3 REALIZACE A OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI SENZORU

V této části práce jsou shrnuty poznatky spojené se samotnou konstrukcí navrženého senzoru snímače průtoku nízkých rychlostí, včetně ověření jeho funkčnosti. Kapitola je rozdělena do částí, které odpovídají jednotlivým funkčním prvkům/blokům senzoru, jak byly navrženy. Senzor byl navržen jako modulární, tzn. že obvod filtru lze zařadit volitelně.

### 3.1 Realizace budicího obvodu

Deska plošného spoje (viz příloha A.2) budicího obvodu byla navržena tak, aby ji bylo možné umístit na jádro budicí cívky. Od jádra je oddělena izolační podložkou a z obou stran je tzv. „vylitá“ plocha (vodivý materiál) taktéž zamezující šíření a vlivu rušení (viz blokové schéma na Obr. 44). Budicí část senzoru tak tvoří jednoduší prvek. Budicí obvod i cívka byly navrženy na základě výsledků počítačového modelování, jehož výsledky byly prezentovány v kapitolách 2.1.1 a 2.1.2. Sestavená budicí část senzoru je zachycena na fotografii na Obr. 48.

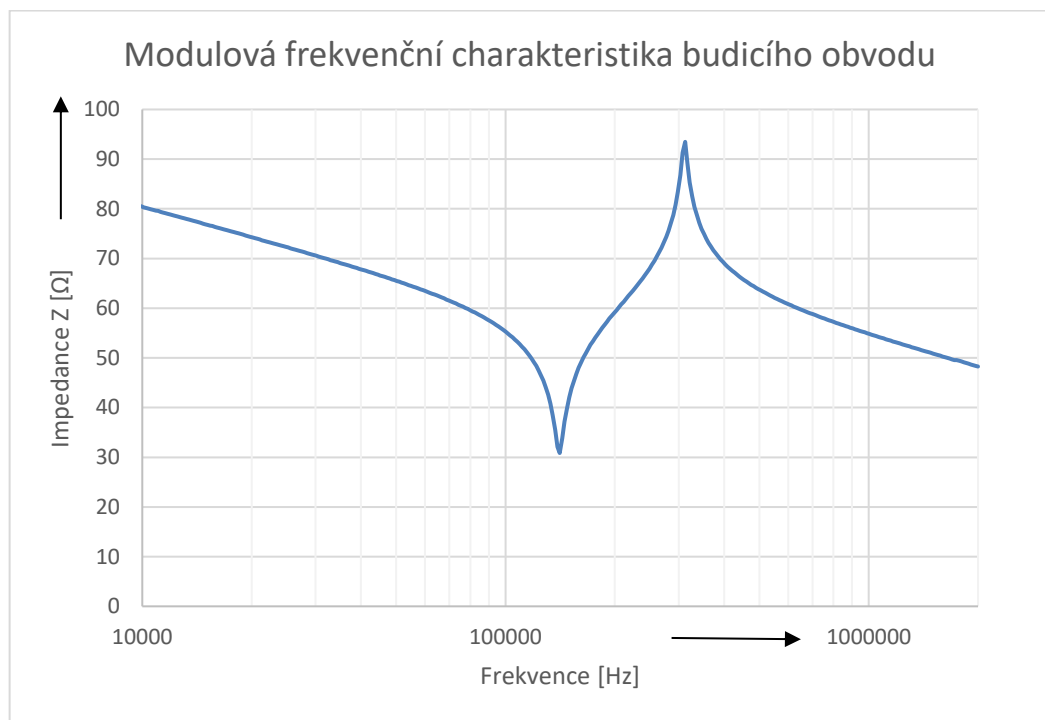


Obr. 48: Sestavená experimentální část budicího bloku senzoru průtokoměru

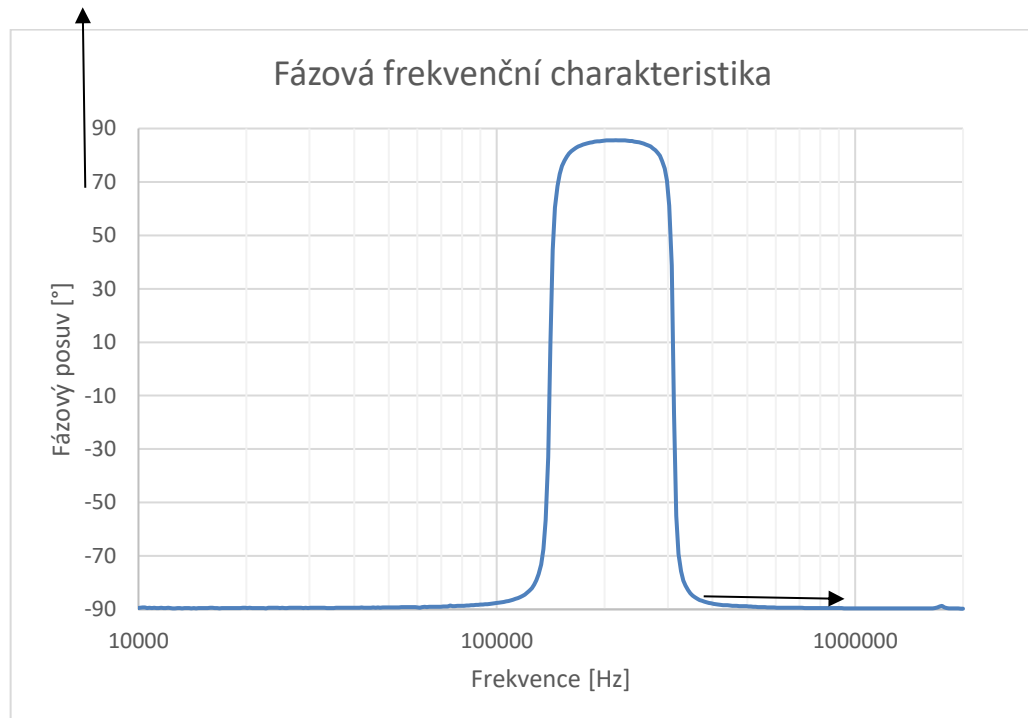
K měření parametrů byl použit analyzátor BODE 100 R1. Uspořádání měřicího pracoviště je analogické se schématem na Obr. 28. Postup měření byl následující:

1. Po teplotní stabilizaci analyzátoru BODE 100 R1 (sériové číslo EK337C) byla provedena kalibrace přístroje
2. Proti rušení byl SMA konektor I-SENSE zakryt.
3. Pomocí analyzátoru BODE a obslužného SW BODE Analyzer Suite byly analyzovány vlastnosti budicího obvodu v rozmezí kmitočtů  $f$  od 5 kHz do 2 MHz
4. Naměřené hodnoty (modul a fáze impedance) byly zpracovány

Naměřená frekvenční charakteristika budicího obvodu je znázorněna na obrázcích Obr. 49 a Obr. 50. Analyzována byla jak amplitudová, tak fázová charakteristika. Kompletní výsledky analýzy jsou k dispozici v příloze B.6 na přiloženém datovém nosiči.



Obr. 49: Modulová frekvenční charakteristika budicího obvodu



Obr. 50: Fázová frekvenční charakteristika budicího obvodu



Kompletní naměřená data jsou k dispozici na přiloženém datovém nosiči v příloze B.6. Při prvním ožívání byl naměřen rezonanční kmitočet přibližně  $f_r=140$  kHz. Tato odchylka byla zřejmě způsobena rozdílnou nežádoucí kapacitou (vůči počítačovému modelu) mezi jednotlivými závity vinutí budicí cívky magnetické části průtokoměru. Vzhledem k tomu, že tento kmitočet  $f_r$  je k naměřeným vlastnostem budicí cívky a navrženého aktivního filtru (tento by pracoval velmi blízko horního mezního kmitočtu) příliš vzdálen od požadovaného ( $f_{rs}=81$ kHz), byl kondenzátor  $C1$  nahrazen za jiný o hodnotě  $2,2$ nF. Takto modifikovaný obvod již dosahuje rezonančního kmitočtu přibližně  $f_r=98$  kHz a jeho signál je tedy v propustném pásmu aktivního filtru na výstupu operačního zesilovače a neuplatní se parazitní vlastnosti budicí cívky.

### 3.2 Realizace snímací desky

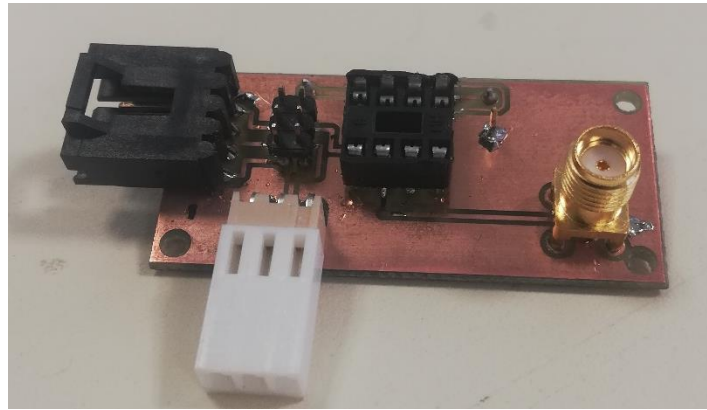
Deska pro snímání elektrické intenzity  $E$  byla vyleptána na DPS, jednotlivé elektrody byly propojeny prokovy. Fotografie je na Obr. 51.



Obr. 51: Snímací deska navrženého průtokoměru

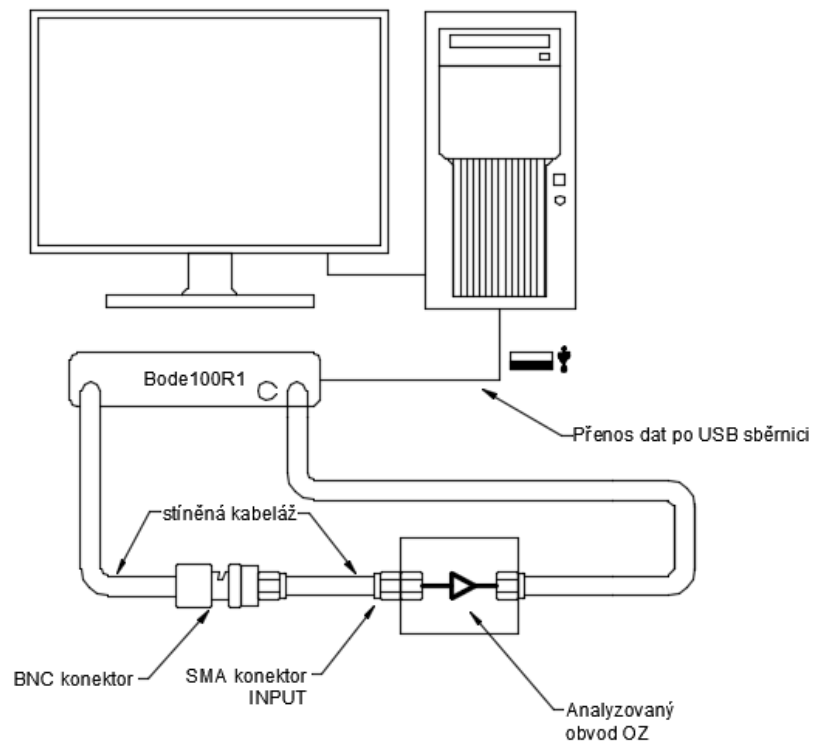
### 3.3 Realizace obvodu operačního zesilovače

Deska obvodu operačního zesilovače, jejíž návrh je v příloze A.3, byla navržena tak, aby bylo možné tento prvek obvodu umístit kolmo na desku snímače, a tedy i osy budicí cívky, čímž je zajištěna minimalizace vlivů magnetického pole, které právě tato cívka ve svém okolí vytváří. Zároveň rozmístění vstupních a výstupních konektorů umožňuje pomocí SMA spojky modulární připojení aktivního filtru. Obvod operačního zesilovače je na fotografii na Obr. 52.



Obr. 52: Obvod operačního zesilovače

Stejně jako v předchozích případech byl využit analyzátor BODE 100 R1. Analyzován byl napěťový přenos A. Schéma měřicího pracoviště je znázorněno na Obr. 53.



Obr. 53: Schéma měřicího pracoviště pro měření napěťového přenosu OZ

Postup měření byl následující:

1. Po teplotní stabilizaci analyzátoru BODE 100 R1 (sériové číslo EK337C) byla provedena kalibrace přístroje.
2. Pomocí analyzátoru BODE a obslužného SW BODE Analyzer Suite byly analyzovány napěťový přenos obvodu operačního zesilovače v rozmezí kmitočtů od 50 kHz do 100 kHz.
3. Naměřené hodnoty byly zpracovány

Na výstupu OZ byl signál značně zkreslený, přičemž při zesilování signálu z generátoru pracoval správně. Proto byla pomocí RLC metru Instek RLC-819 změřena kapacita snímací desky, která činí na kmitočtu 98 kHz 10 pF. Tato kapacita na vstupu ovlivnila průběh výstupního signálu, proto byl do obvodu zpětné OZ zařazen kompenzační kondenzátor  $C_P$ , který uvedené zkreslení minimalizoval. Dle [18] je hodnota kompenzačního kondenzátoru dána vztahem

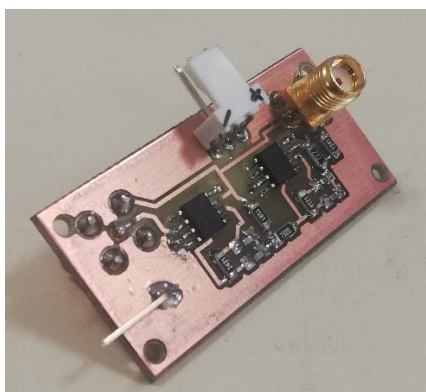
$$\begin{aligned}C_{par} \cdot R_1 &= C_P \cdot R_2, \\C_P &= \frac{C_{par} \cdot R_1}{R_2}, \\C_P &= \frac{10^{-11} \cdot 10^2}{10^3}, \\C_P &= 10^{-12} = 1 \text{ pF}.\end{aligned}\tag{3.1}$$

kde  $C_{par}$  představuje parazitní kapacitu na vstupu OZ [F],

$R_1, R_2$  představují rezistory nastavující zesílení OZ [ $\Omega$ ].

### 3.4 Realizace obvodu aktivního filtru

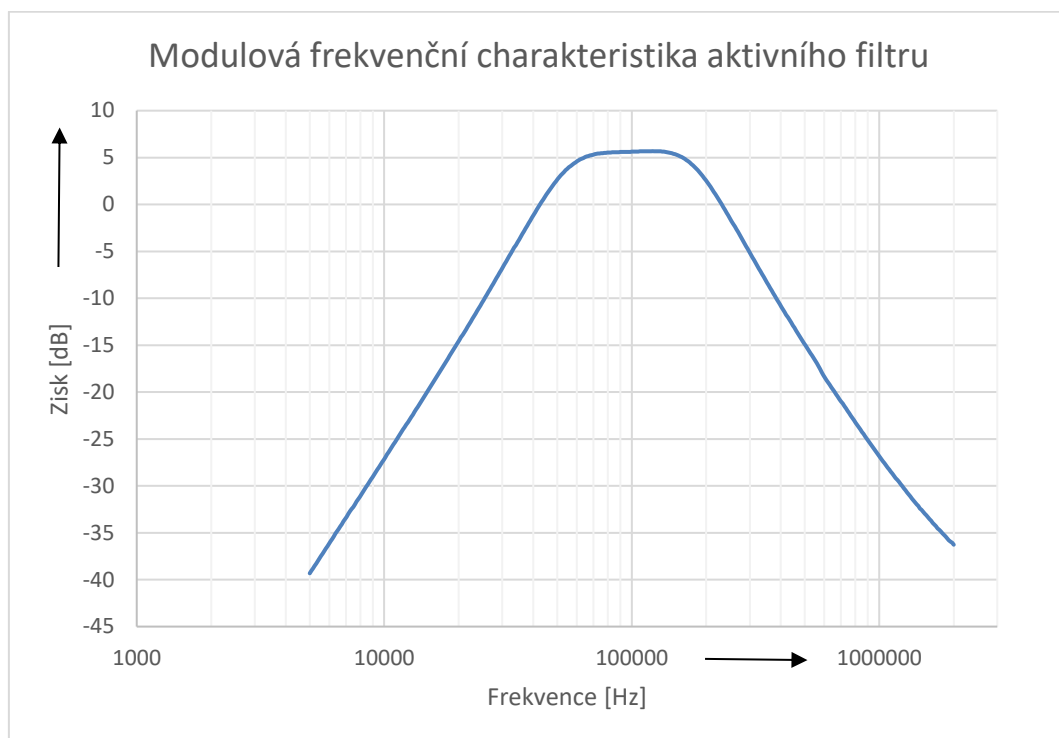
Deska plošných spojů aktivního filtru je k dispozici v příloze A.4. Fotografie zkonstruovaného filtru je na Obr. 54.



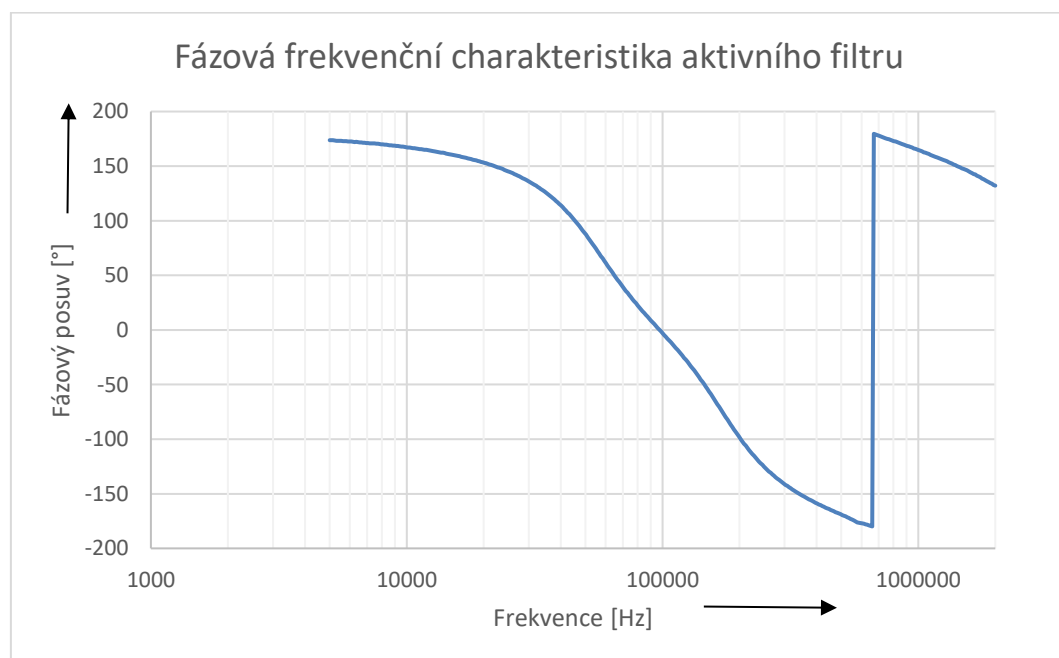
Obr. 54: Aktivní filtr pro navržený průtokoměr

Zkonstruovaný obvod byl analyzován ve frekvenčních parametrech – amplitudová a frekvenční charakteristika. K tomu byl využit analyzátor BODE 100R, měřící postup i schéma jsou analogické s měřením parametrů OZ v předešlé kapitole.

Na Obr. 55 je znázorněna naměřená amplitudová frekvenční charakteristika, na Obr. 56 pak fázová. Kompletní naměřené hodnoty jsou k dispozici v příloze B.7.



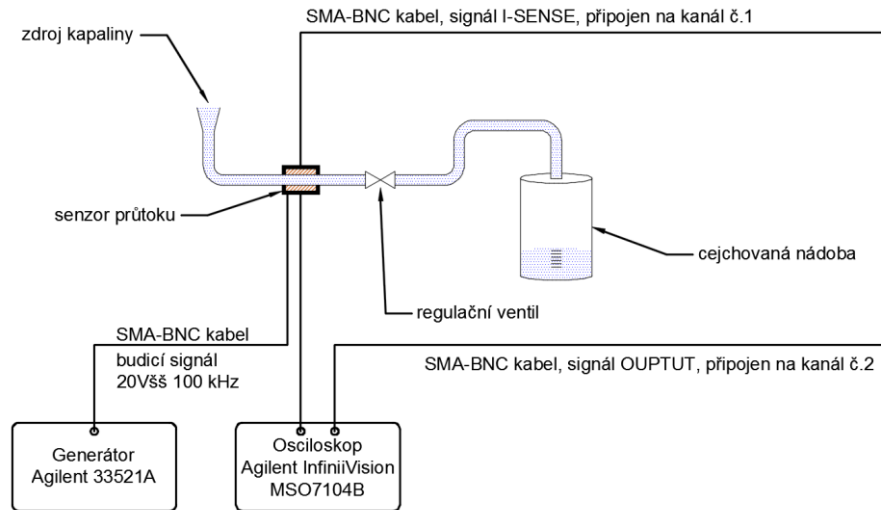
Obr. 55: Modulová frekvenční charakteristika aktivního filtru



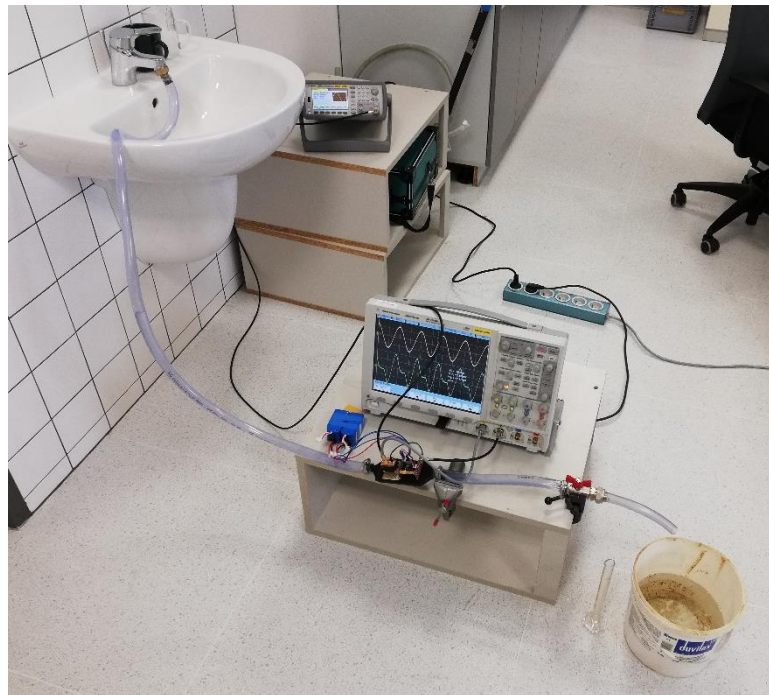
Obr. 56: Fázová frekvenční charakteristika aktivního filtru

### 3.5 Měření průtoku

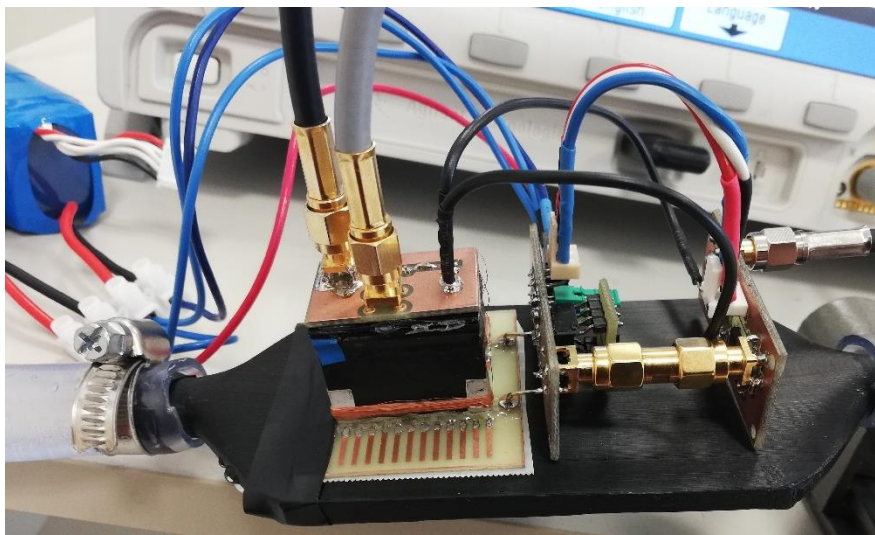
Schéma měřicího pracoviště je znázorněné na Obr. 57, samotná fotografie pracoviště je na Obr. 58, detail na senzor je na Obr. 59. Při návrhu byla respektována pravidla pro umístění průtokoměru (srovnávací délky potrubí – turbulence atd.), která byla shrnuta v kapitole 1.4.6.



Obr. 57: Schéma měřicího pracoviště



Obr. 58: Měřicí pracoviště testování navrženého funkčního vzorku průtokoměru



Obr. 59: Detail umístění senzoru na vzorek měřicího vedení

Jako zdroj kapaliny slouží běžná voda z vodovodního řádu (chemický rozbor nebyl detailně prováděn). Průtok v systému je regulován ventilem umístěným za senzorem. Tím se dosahuje požadovaného průtoku vody za jednotku času a stanoví se v měřicím vedení očekávaná rychlost proudění kapaliny. Pro přívod kapaliny k měřicímu vedení byla pro laboratorní účely použita PVC hadice o průměru ½“. Pro nastavení požadované rychlosti průtoku (v rozmezí 0,01 – 1 mm/s) je využita cejchovaná nádoba – odměrný válec cejchovaný v mililitrech, kdy je měřen časový úsek, za který dojde k naplnění daného objemového elementu. Toto vychází ze vztahu (3.2).

$$V = S \cdot v \cdot \Delta t$$

$$v = \frac{V}{S \cdot \Delta t} \quad (3.2)$$

Pro laboratorní potřeby bylo navrženo a pomocí 3D tiskárny vytvořeno měřicí potrubí pro vedení kapaliny rovnoměrně rozloženého proudění z přívodní části trubice, jejíž fotografie je na Obr. 60. Kompletní rozměry jsou pak k dispozici v příloze A.5. V trubici a měřicím vedení je umístěno žebrování, které zajišťuje rovnoměrné rozložení proudící kapaliny v celém průřezu (2x 56 mm). Průřez byl zároveň navržen tak, aby nevytvářel zásadní změny tlakových poměrů vedení kapaliny, tedy například konstantní průřez vstupního i výstupního řezu vedení kapaliny. Rychlost průtoku byla při měření sledována v prostoru měřicího vedení.



Obr. 60: Měřicí vedení, její napojení na přívod a regulaci rychlosti proudění kapaliny.

Pomocí koaxiálních elektrických kabelů jsou výstupy z navrženého senzoru (I-SENSE a OUTPUT) připojeny na různé kanály osciloskopu Agilent InfiniiVision

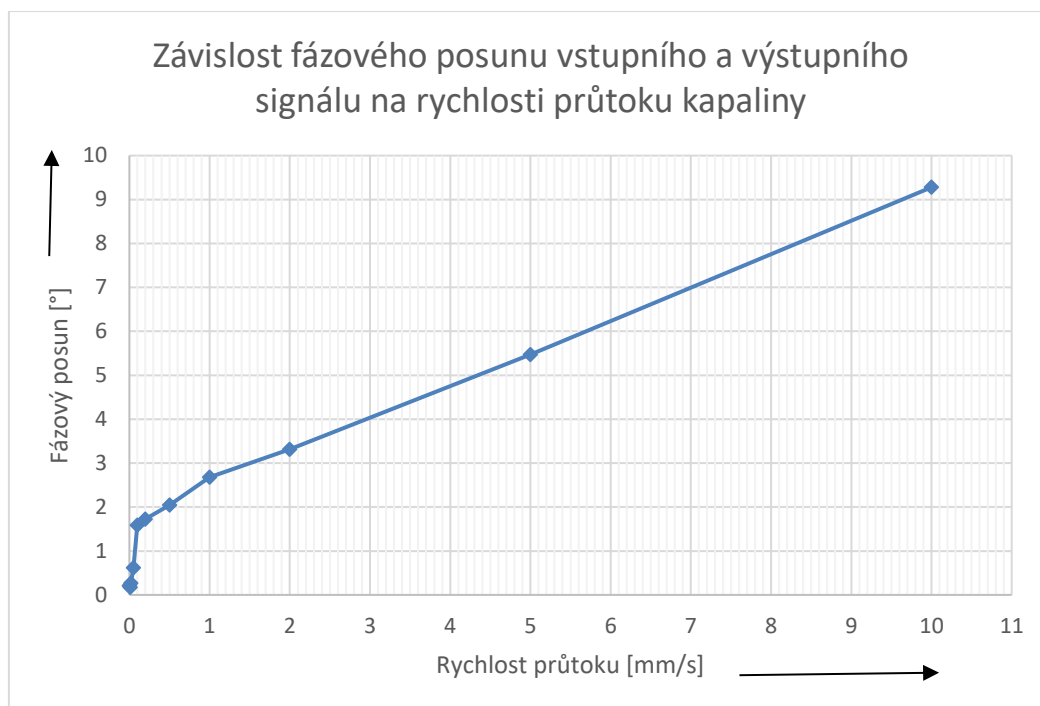
MSO7104B, ve kterém se následně analyzuje jejich fázový posuv. Jako generátor je použit přístroj Agilent 33521A, jehož výstupní signál má parametry 20 V<sub>šš</sub> a 98 kHz.

Průtok byl analyzován v rozmezí 0,01 mm/s až 10 mm/s. Průtoky v řádu setin milimetru za sekundu se již nastavovaly velmi obtížně a z tohoto důvodu je v tomto řádu měření již zkreslené a jeho výsledky nelze považovat za korektní. Zároveň rychlosti  $v$  průtoku kapaliny v těchto řádech považují za nutnost absolutní těsnost celého systému a znalost okamžitých průběhů v měřicím vedení dříve analyzovaných a ověřených. V testovacím vedení a jeho sestavení i velmi malé netěsnosti dokáží ovlivnit výslednou rychlost v celém systému, a tedy i uvnitř měřicí trubice. Naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulce Tab. 8 a grafické závislosti na Obr. 61.

Tab. 8: Naměřené hodnoty fázového posunu v závislosti na rychlosti průtoku kapaliny

<b>Rychlost průtoku</b>	<b>Časový posun <math> \Delta x </math></b>	<b>Fázový posun</b>
<b>[mm/s]</b>	<b>[ns]</b>	<b>[°]</b>
<b>10</b>	263	9,279
<b>5</b>	155	5,468
<b>2</b>	94	3,316
<b>1</b>	71	2,681
<b>0,5</b>	58	2,046
<b>0,2</b>	49	1,729
<b>0,1</b>	45	1,588
<b>0,05</b>	17,5	0,617
<b>0,02</b>	7,5	0,265
<b>0,01</b>	5	0,176
<b>0</b>	6	0,212





Obr. 61: Graf závislosti fázového posunu vstupního a výstupního signálu na rychlosti  $v$  průtoku kapaliny měřicím vedením.

Fázový posun  $\Delta\varphi$  byl vypočítán z naměřeného časového posunu dle vztahu (vzor pro první řádek tabulky)

$$\Delta\varphi = 360 \cdot \frac{\Delta x}{f},$$

$$\Delta\varphi = 360 \cdot \frac{263 \cdot 10^{-9}}{98 \cdot 10^3}, \quad (3.3)$$

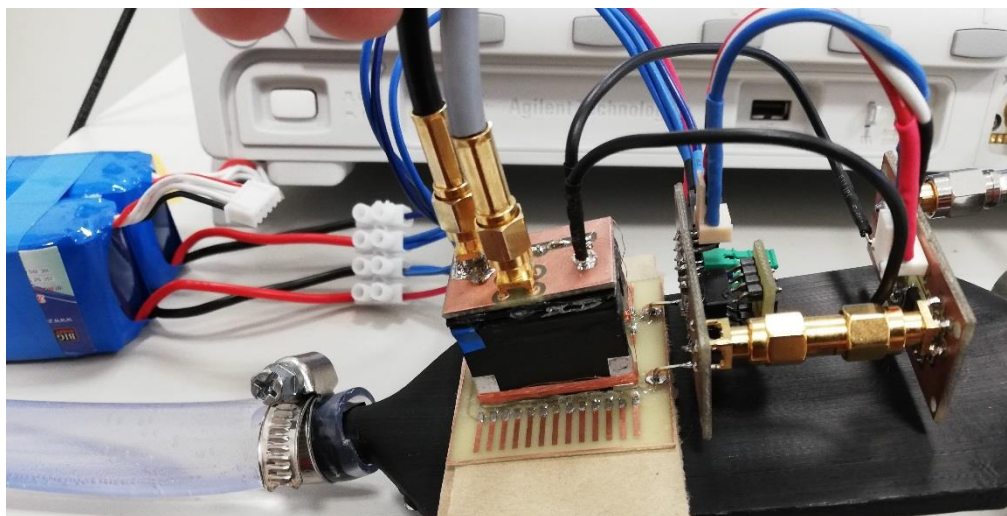
$$\Delta\varphi = 9,279^\circ.$$

Z grafické závislosti je patrné, že zhruba do rychlosti průtoku  $v = 0,1$  mm/s senzor pracuje lineárně, tedy dle teoretických předpokladů v předchozím textu diskutovaných, pro menší průtoky již převodní křivka senzoru není lineární (není známý rychlostní profil proudění v měřicím vedení). Tuto skutečnost nijak neovlivnilo ani zvýšení elektrického napětí vstupního budicího signálu generovaného a připojeného do budicího vinutí cívky.

Zásadní vliv neměla na výsledek měření ani změna vzdálenosti senzoru od snímací trubice. Mezi snímací desku a měřicí trubici byl umístěna podložka zhotovená z kartonu o výšce 5mm. Došlo sice k velmi mírnému snížení amplitudy výstupního signálu, nicméně měření nebylo zásadně ovlivněno. Tento fakt dokládá teoretický předpoklad ze simulace průběhu magnetické indukce (viz grafické závislosti na Obr. 38 a Obr. 39). Snížení amplitudy dokazuje oscilogram č. 21 v příloze B.8, kdy měřené výstupní napětí dosahuje hodnoty 177 mVšš. V ostatních případech, jak je z oscilogramů č. 1 až č. 20 patrné, dosahuje výstupní signál hodnoty kolem 220 mVšš.



Oscilogramy pro všechny měřené rychlosti  $v$  průtoku kapaliny jsou k dispozici v příloze B.8.



Obrázek 62: Měření, uspořádání senzoru s distanční podložkou

## 4 ZÁVĚR

Byl proveden rozbor stavu řešení a dosahovaných parametrů průtokoměrů na bázi induktivního principu, byla provedena teoretická analýza elektromagnetického pole sdružené elektromagnetické úlohy a navrženy elektronické a elektrické obvody, pro experimentální ověření měření rychlosti v proudící kapaliny pro rozsah  $v=0.01-1$  mm/s.

Navržený funkční vzorek průtokoměru byl sestaven pro zvolený rezonanční princip NDD měření pomocí indukčního principu s vyhodnocením fázově změny impedance v závislosti na rychlosti proudění média.

Bylo provedeno oživení a nastavení funkčního vzorku, byla provedena měření a testy funkčnosti navrženého průtokoměru.

Průtokoměr v práci popsaný vyhovuje požadavkům zadání a je schopen měřit rychlosti proudění se zadanými parametry.

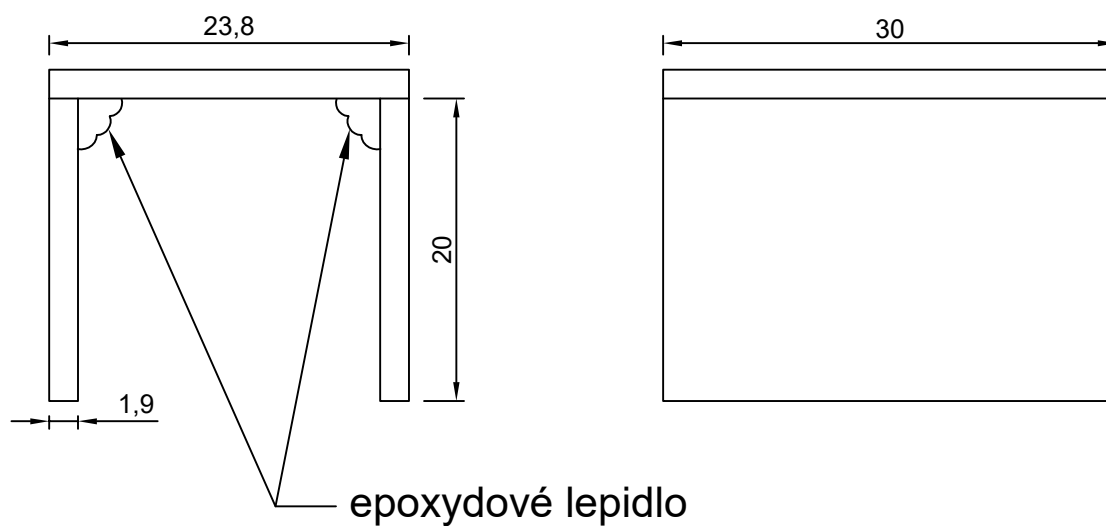
# LITERATURA

- [1] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-156-X.
- [2] ŠEN, Jaroslav, Jan KOLUCH a Miroslav KOTAL. *Indukční průtokoměr*. Ostrava-Radvanice: Vědeckovýzkum. uhelný ústav, 1982. Zpráva č. 198
- [3] KADLEC, Karel. *Indukční průtokoměr - princip, vlastnosti a použití*. Automa: časopis pro automatizační techniku. 2012, (10), 11-13. ISSN 1210-9592.
- [4] FRIEDL, M.; MARCOŇ, P.; FIALA, P.; KUBÁSEK, R. *Measurement of concentration and water flow*. *Progress In Electromagnetics, 2011*, vol. 2011, no. 2011, p. 1153-1157. ISSN: 1559-9450.
- [5] FIALA, P. *Model indukčního průtokoměru*. In 9. ANSYS Users Meeting, Česká republika a Slovensko, 25.9-26.9.2001 Třešť Sekce C 1-28, p.6. Brno: SVS FEM s.r. o Brno, 2001. s. 6 ( s.)
- [6] DĚDEK, Libor a Jarmila DĚDKOVÁ. *Elektromagnetismus*. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 80-214-1106-6.
- [7] BURIAN, Ivan, Libor DĚDEK a Jarmila DĚDKOVÁ. *Analysis and optimization of an inductive flowmeter*. 8<sup>th</sup> International Symposium on theoretical electrical engineering, Thessaloniki, September 22-23,1995,p.506-509
- [8] FLEISCHNER, Petr. *Hydromechanika*. Skripta VUT FS, VUT Brno, 1990. ISBN 80-214-0266-1.
- [9] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02731-7.
- [10] *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9.
- [11] Kikuchi, H., *Electrohydrodynamics in Dusty and Dirty Plasmas: Gravitoelectrodynamics and EHD*, pp. 227. May 2001, Springer Netherlands, ISBN- 10:0792368223, ISBN - 13:9780792368229.
- [12] FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 3rd ed. New York: Springer, c2004. ISBN 0-387-00750-4.
- [13] LIPTÁK, Béla G., ed. *Instrument engineers' handbook*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, c2003. ISBN 0-8493-1083-0.
- [14] *Low level measurements handbook - 7th edition* [online]. 7. USA: Keithley, Tektronix Company, 2016 [cit. 2018-05-16]. ISBN -. Dostupné z: <https://www.tek.com/document/handbook/low-level-measurements-handbook>
- [15] VRBA, Kamil. *Konstrukce elektronických zařízení* [online]. Brno: elektronicky, 2013 [cit. 2019-03-19].
- [16] *Ultra-Low Bias Current DiFET Operational amplifier* [online]. , 15 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa129.pdf>
- [17] *Část plánu využití rádiového spektra č. PV-P/27/01.2012-1 pro kmitočtové pásmo 9 - 27 500 kHz: Opatření obecné povahy* [online]. In: . Český telekomunikační úřad [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [https://www.ctu.cz/cs/download/plan-vyuziti-radioveho-spektra/rok\\_2012/pv-p\\_27-01\\_2012-01.pdf](https://www.ctu.cz/cs/download/plan-vyuziti-radioveho-spektra/rok_2012/pv-p_27-01_2012-01.pdf)

- [18] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-187-2.

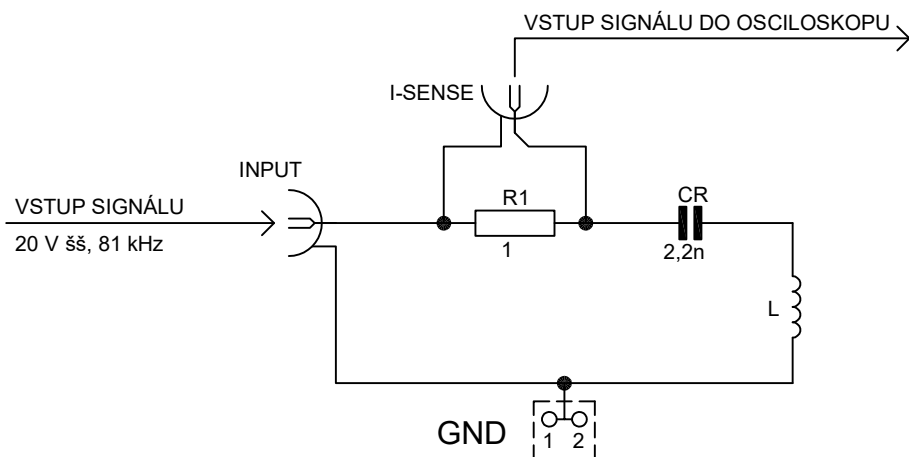
# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Výkresová část</b>	<b>74</b>
A.1	Feritové jádro .....	74
A.2	Schéma budicího obvodu .....	75
A.3	Schéma obvodu operačního zesilovače .....	76
A.4	Schéma obvodu aktivního filtru.....	77
A.5	Měřicí vedení .....	78
<b>B</b>	<b>Datová část</b>	<b>79</b>
B.1	Výsledky měření zkušebního vinutí budicí cívky.....	79
B.2	Model budicího obvodu magnetického obvodu průtokoměru .....	80
B.3	Model obvodu snímací části průtokoměru-operačního zesilovače.....	81
B.4	Model obvodu aktivního filtru .....	82
B.5	Model kompletního obvodu.....	83
B.6	Měření frekvenčních charakteristik budicího obvodu .....	84
B.7	Měření parametrů obvodu aktivního filtru.....	85
B.8	Měření průtoku .....	86



PŘEDMĚT	DIPLOMOVÁ PRÁCE		
NÁZEV PRÁCE	SENZOR PRO NÍZKORYCHLOSTNÍ SNÍMÁNÍ POHYBU KONTINUA		
VYPRACOVAL	Bc. PETR TOMÁŠEK		
VEDOUCÍ PRÁCE	prof. Ing. PAVEL FIALA, Ph.D.	FORMÁT	1xA4
ÚSTAV	ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY	DATUM	16.5.2019
NÁZEV VÝKRESU: FERITOVÉ JÁDRO		MEŘÍTKO 2:1	Č. VÝKRESU A.1

# SCHÉMA ZAPOJENÍ

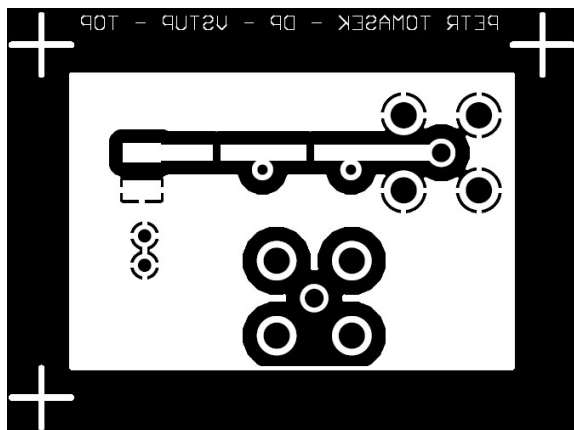


## TABULKA PRVKŮ OBVODU

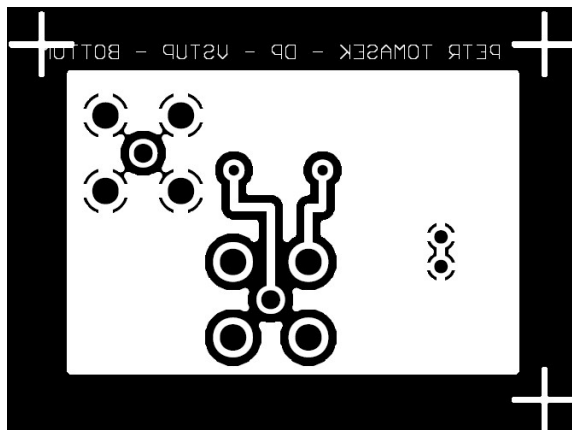
PRVEK	HODNOTA	POUZDRO
INPUT	-	SMA female
R1	1 Ω	0805
CR	2,2 nF	0805
L	2,3 mH	viz příloha A.1
GND 1,2	-	Molex KK254 Header

## DESKA DPS (M 2:1)

Vrstva TOP

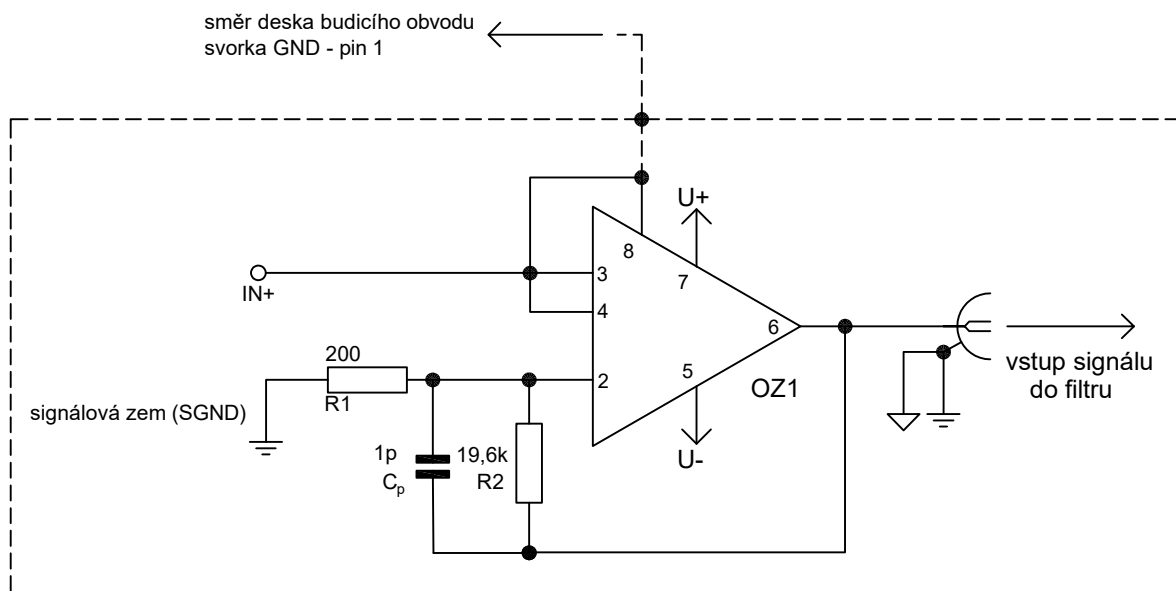
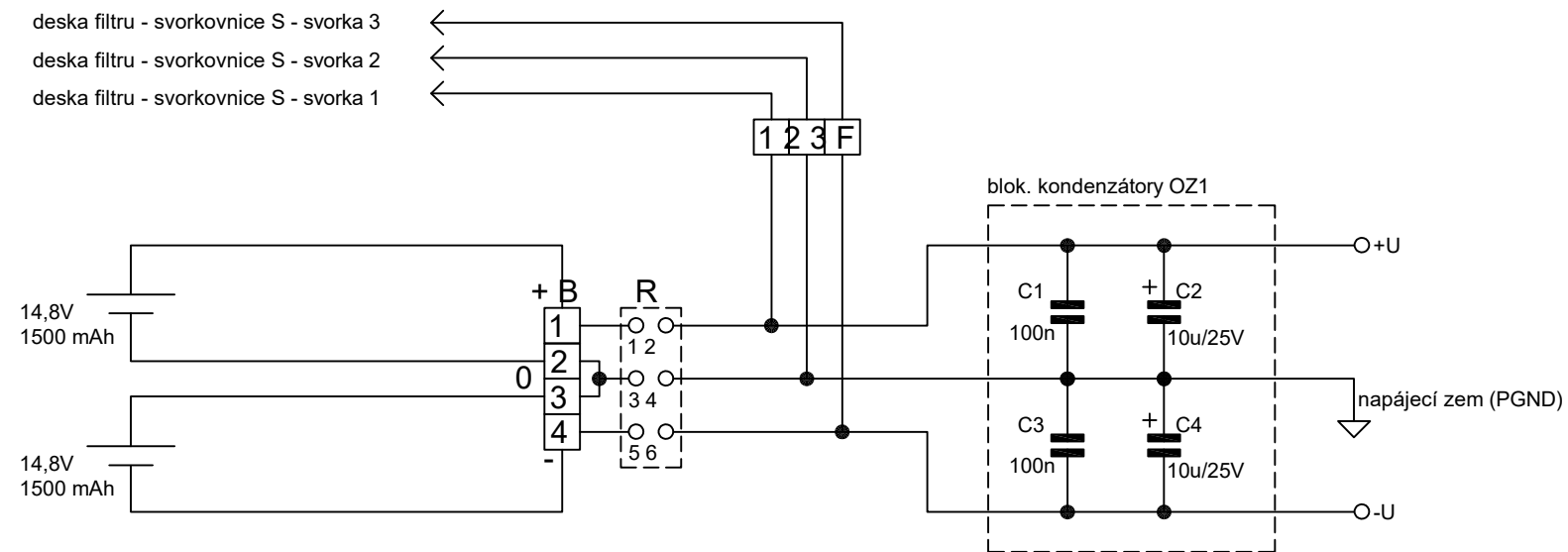


Vrstva BOTTOM



PŘEDMĚT	DIPLOMOVÁ PRÁCE		
NÁZEV PRÁCE	SENZOR PRO NÍZKORYCHLOSTNÍ SNÍMÁNÍ POHYBU KONTINUA		
VYPRACOVAL	Bc. PETR TOMÁŠEK	FORMÁT	1xA4
VEDOUCÍ PRÁCE	prof. Ing. PAVEL FIALA, Ph.D.	DATUM	16.5.2019
ÚSTAV	ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY	MEŘÍTKO	Č. VÝKRESU A.2
NÁZEV VÝKRESU: SCHÉMA BUDICÍHO OBVODU		-	

## SCHÉMA ZAPOJENÍ

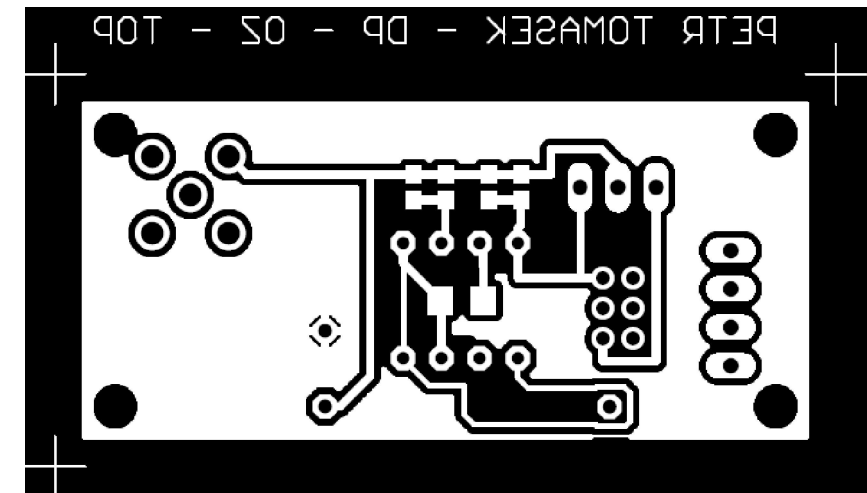


## TABULKA PRVKŮ OBVODU

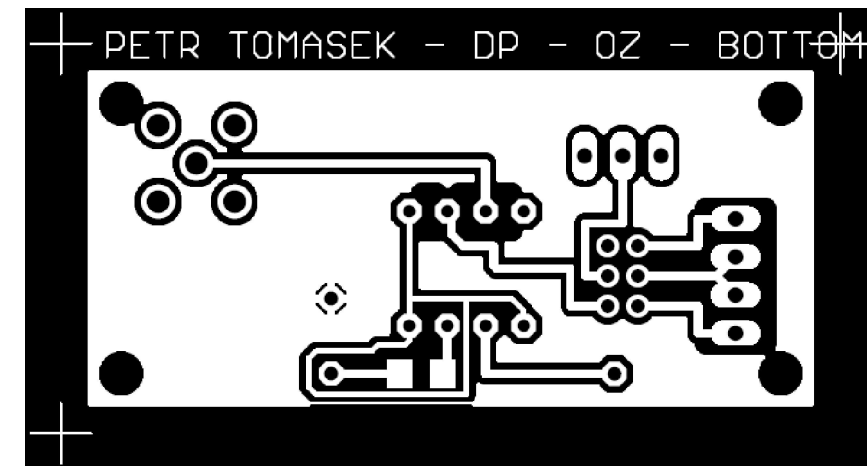
PRVEK	HODNOTA	POUZDRO
B	-	Molex KK 254-4
R	-	Molex Milli-Grid konektor
F	-	Molex KK 254-3
C2, C4	100 nF	0603, tantalové
C1, C3	10 uF	0603
Cp	1 pF	0603
R1	200 Ω	1206
R2	19,6 kΩ	1206
OZ1	TI OPA 129	DIL8 - SOIC
OUTPUT -	-	SMA konektor female

## DESKY DPS (M 2:1)

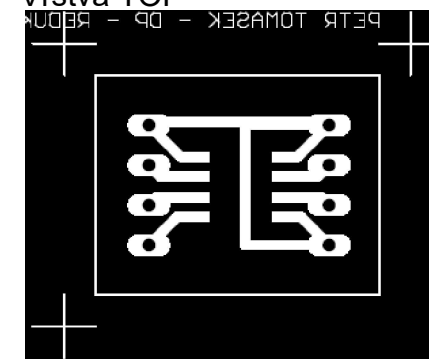
Vrstva TOP



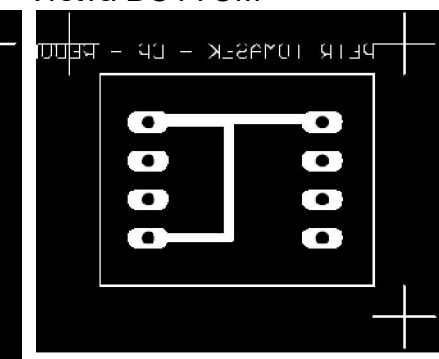
Vrstva BOTTOM



Vrstva TOP



Vrstva BOTTOM

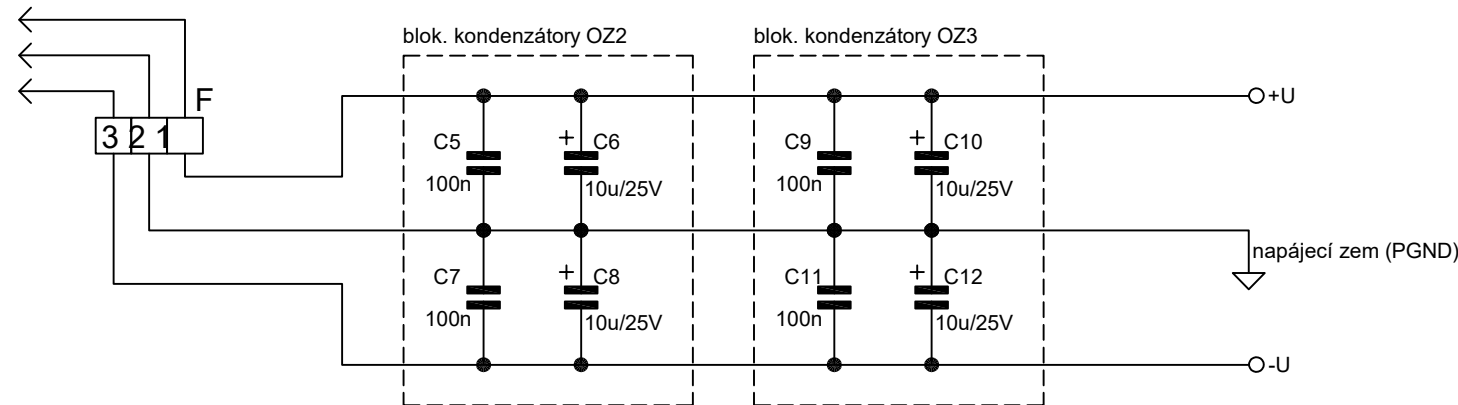


PŘEDMĚT	DIPLOMOVÁ PRÁCE		
NÁZEV PRÁCE	SENZOR PRO NÍZKORYCHLOSTNÍ SNÍMÁNÍ POHYBU KONTINUA		
VYPRACOVAL	Bc. PETR TOMÁŠEK	FORMÁT	1x4
VEDOUČÍ PRÁCE	prof. Ing. PAVEL FIALA, Ph.D.	DATUM	16.5.2019
ÚSTAV	ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY	MEŘÍTKO	Č. VÝKRESU
NÁZEV VÝKRESU:	SCHÉMA OBVODU OPERAČNÍHO ZESILOVAČE	-	A.3



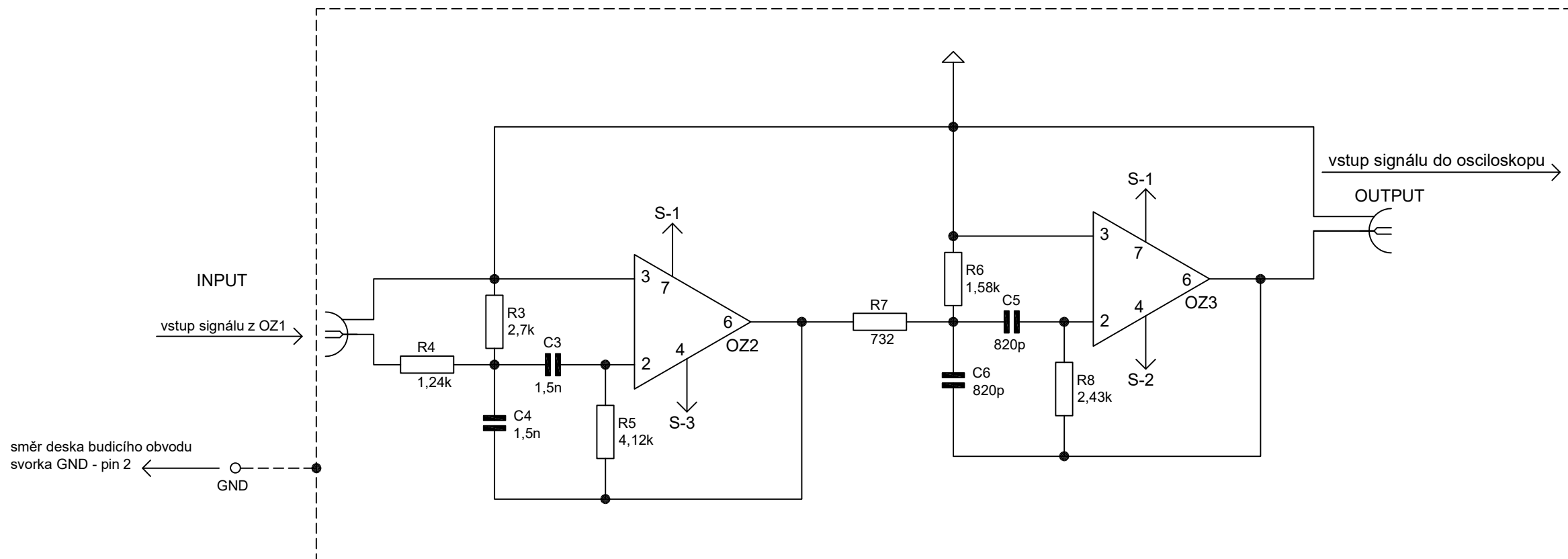
# SCHÉMA ZAPOJENÍ

deska OZ - svorkovnice F - svorka 1  
 deska OZ - svorkovnice F - svorka 2  
 deska OZ - svorkovnice F - svorka 3



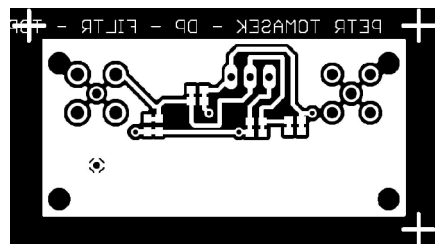
# TABULKA PRVKŮ OBVDU

PRVEK	HODNOTA	POUZDRO
S	-	TE Amp-Quick konektor
R3	1,24 kΩ	1206
R4	2,7 kΩ	1206
R5	4,12 kΩ	1206
R6	1,58 kΩ	1206
R7	732 Ω	1206
R8	2,43 kΩ	1206
C3	1,5 nF	0603
C4	1,5 nF	0603
C5	820 pF	0603
C6	820 pF	0603
C7, C8	100 nF	0603
C9, C10	100 nF	0603
OZ2	OPA27	SOIC8
OZ3	OPA27	SOIC8
INPUT	-	SMA konektor female
OUTPUT	-	SMA konektor female

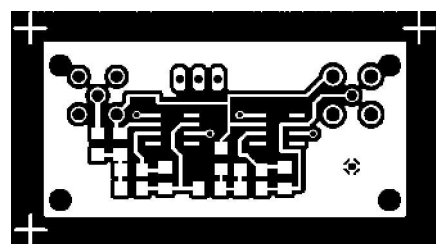


# DESKY DPS (M 1:1)

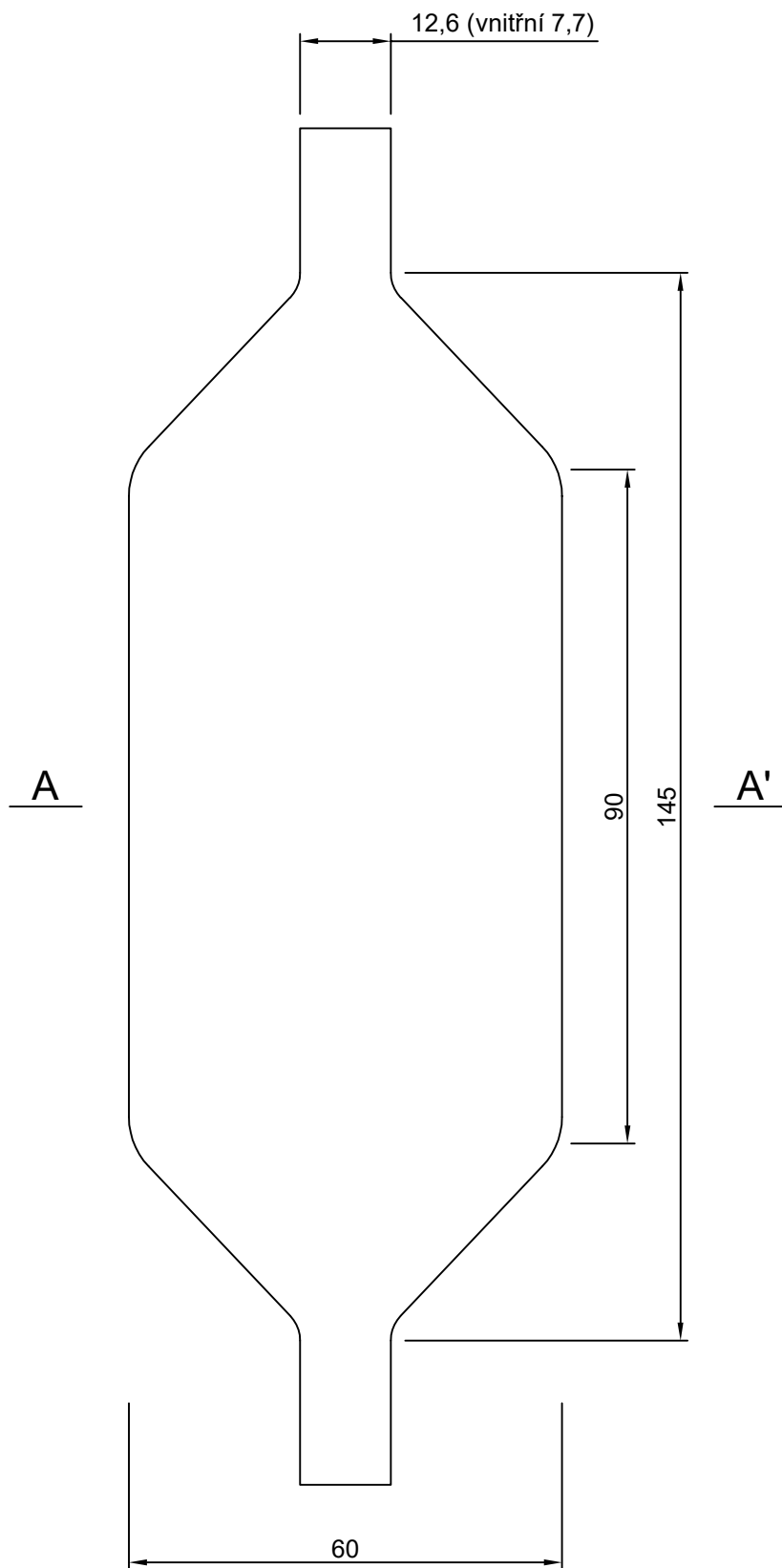
Vrstva TOP



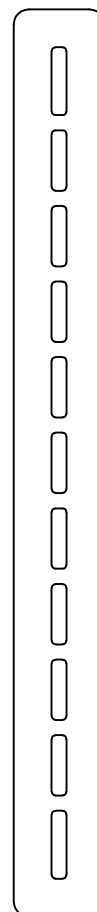
Vrstva BOTTOM



PŘEDMĚT	DIPLOMOVÁ PRÁCE		
NÁZEV PRÁCE	SENZOR PRO NÍZKORYCHLOSTNÍ SNÍMÁNÍ POHYBU KONTINUA		
VYPRACOVAL	Bc. PETR TOMÁŠEK		
VEDOUČÍ PRÁCE	prof. Ing. PAVEL FIALA, Ph.D.		
ÚSTAV	ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY		
NÁZEV VÝKRESU:	SCHÉMA OBVDU AKTIVNÍHO FILTRU	FORMÁT	1xA4
		DATUM	16.5.2019
		MEŘÍTKO	Č. VÝKRESU A.4



ŘEZ A-A' (M 2:1)



PŘEDMĚT	DIPLOMOVÁ PRÁCE		
NÁZEV PRÁCE	SENZOR PRO NÍZKORYCHLOSTNÍ SNÍMÁNÍ POHYBU KONTINUA		
VYPRACOVAL	Bc. PETR TOMÁŠEK	FORMÁT	1xA4
VEDOUCÍ PRÁCE	prof. Ing. PAVEL FIALA, Ph.D.	DATUM	16.5.2019
ÚSTAV	ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY	MEŘÍTKO	Č. VÝKRESU
NÁZEV VÝKRESU: MĚŘICÍ VEDENÍ		1:1	A.5

## **B DATOVÁ ČÁST**

### **B.1 Výsledky měření zkušebního vinutí budicí cívky**

Kompletní výsledky měření jsou k dispozici na přiloženém datovém nosiči.

Cesta k souboru:

\\kořenový adresář\B. Datová část\B.1 Výsledky měření zkušebního návinnu cívky\

## **B.2 Model budicího obvodu magnetického obvodu průtokoměru**

Model vytvořený v SW Micro-CAP je k dispozici na přiloženém datovém nosiči.

Cesta k souboru:

\\kořenový adresář\B. Datová část\B.2 Model budicího obvodu\

### **B.3 Model obvodu snímací části průtokoměru-operačního zesilovače**

Model vytvořený v SW Micro-CAP je k dispozici na přiloženém datovém nosiči.

Cesta k souboru:

\\kořenový adresář\B. Datová část\B.3 Model obvodu operačního zesilovače\

## **B.4 Model obvodu aktivního filtru**

Model vytvořený v SW Micro-CAP je k dispozici na přiloženém datovém nosiči.

Cesta k souboru:

\\kořenový adresář\B. Datová část\B.4 Model obvodu aktivního filtru\

## **B.5 Model kompletního obvodu**

Model vytvořený v SW Micro-CAP je k dispozici na přiloženém datovém nosiči.

Cesta k souboru:

\\kořenový adresář\B. Datová část\B.5 Model kompletního obvodu\

## **B.6 Měření frekvenčních charakteristik budicího obvodu**

Naměřené hodnoty, včetně vyjádřených grafických závislostí jsou k dispozici na příloženém datovém nosiči.

Cesta k souboru:

\\kořenový adresář\B. Datová část\B.6 Měření frekvenčních charakteristik budicího obvodu\



## **B.7 Měření parametrů obvodu aktivního filtru**

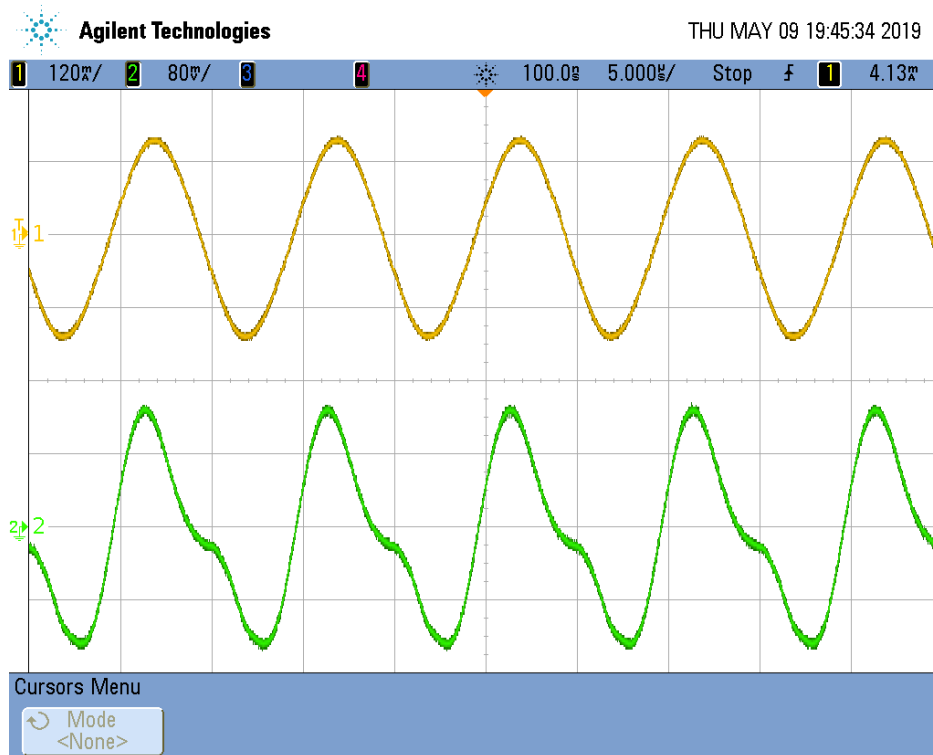
Naměřené hodnoty, včetně vyjádřených grafických závislostí jsou k dispozici na příloženém datovém nosiči.

Cesta k souboru:

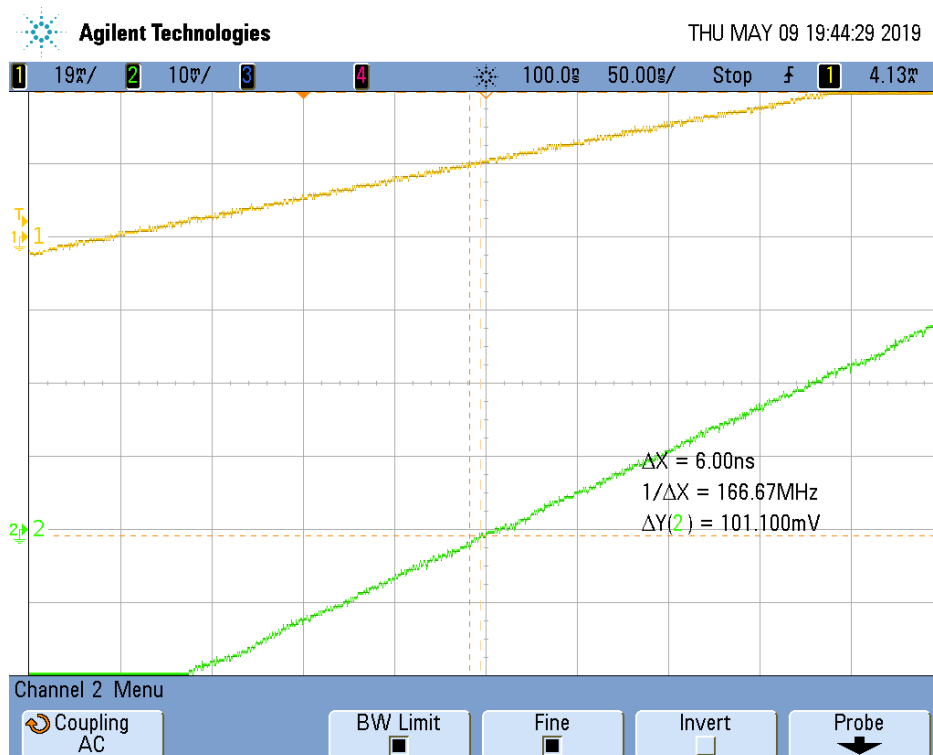
\\kořenový adresář\B. Datová část\B.7 Měření parametrů obvodu aktivního filtru\

## B.8 Měření průtoku

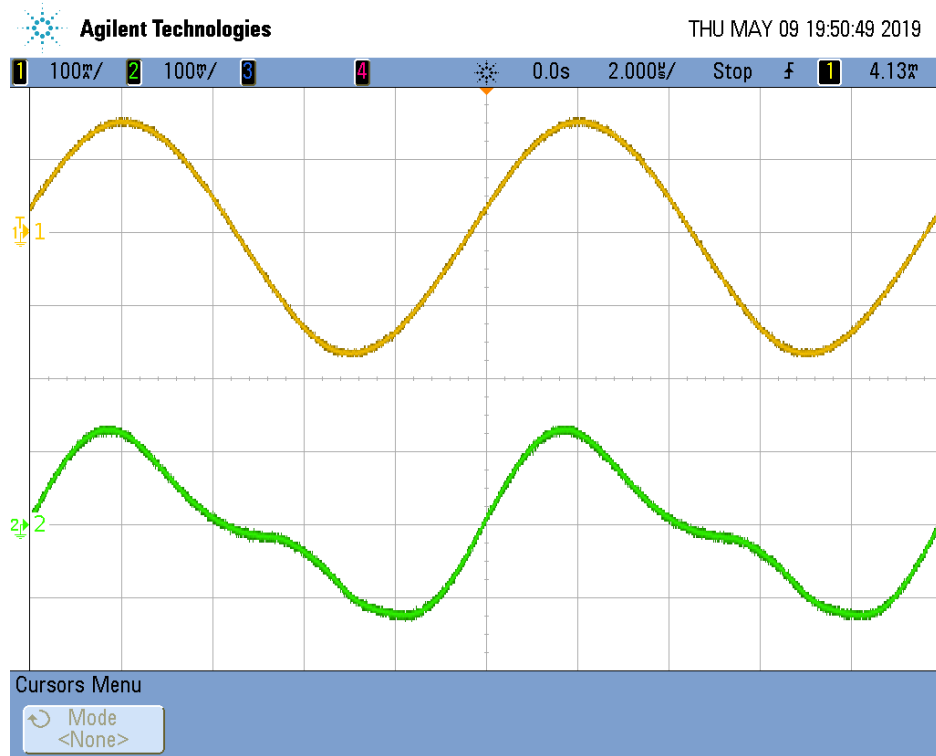
1) Oscilogram  $v = 0$  mm/s



2) Oscilogram  $v = 0$  mm/s (detail)



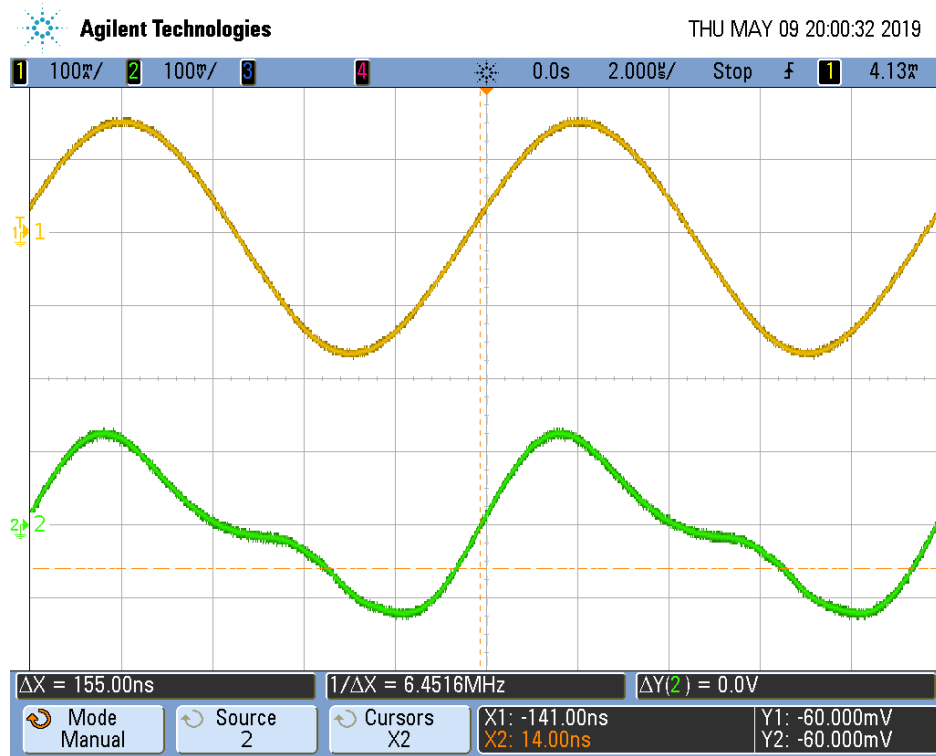
3) Oscilogram  $v = 10 \text{ mm/s}$



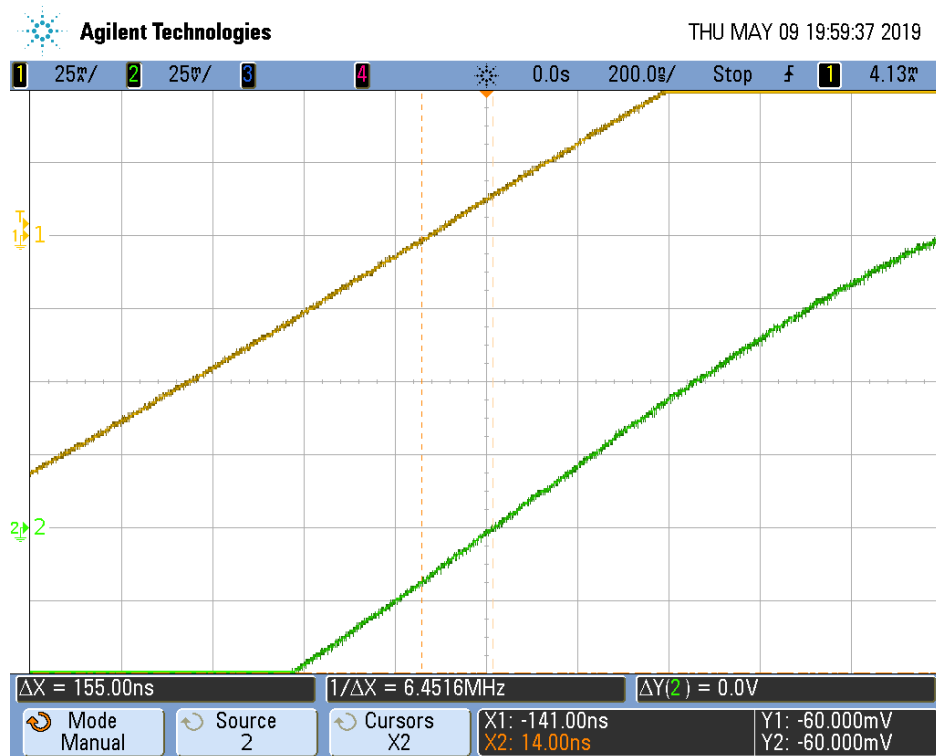
4) Oscilogram  $v = 10 \text{ mm/s}$  (detail)



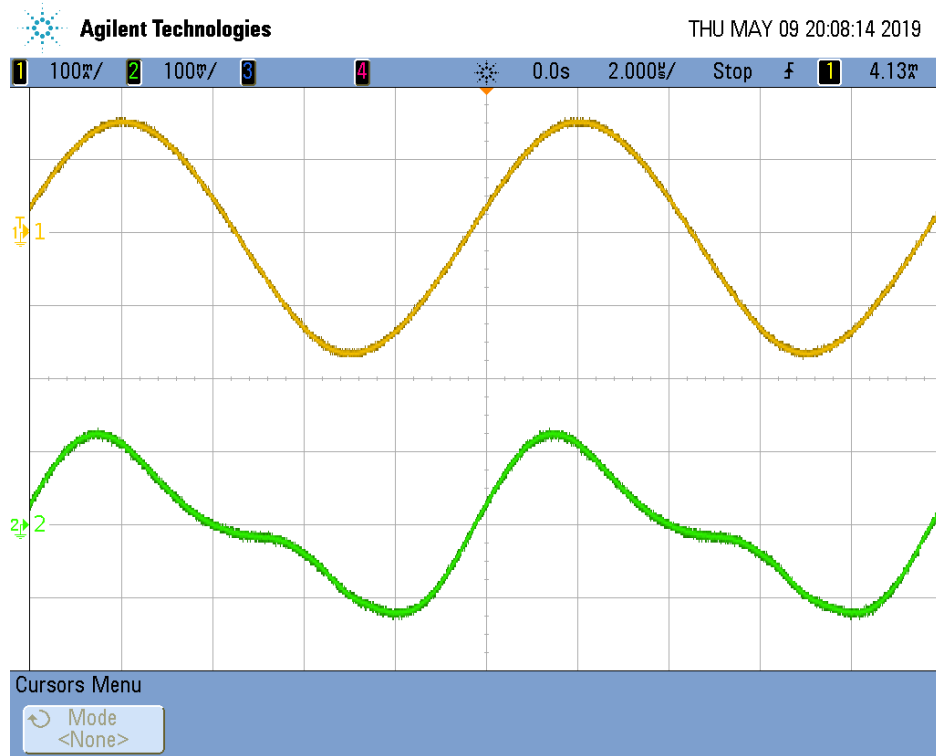
5) Oscilogram  $v = 5 \text{ mm/s}$



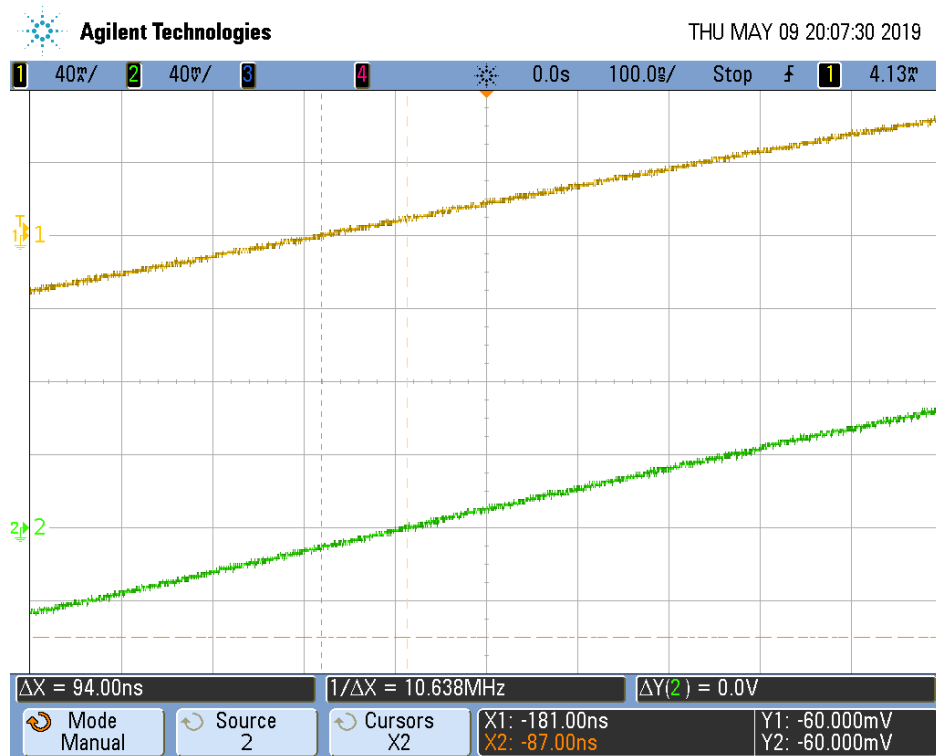
6) Oscilogram  $v = 5 \text{ mm/s}$  (detail)



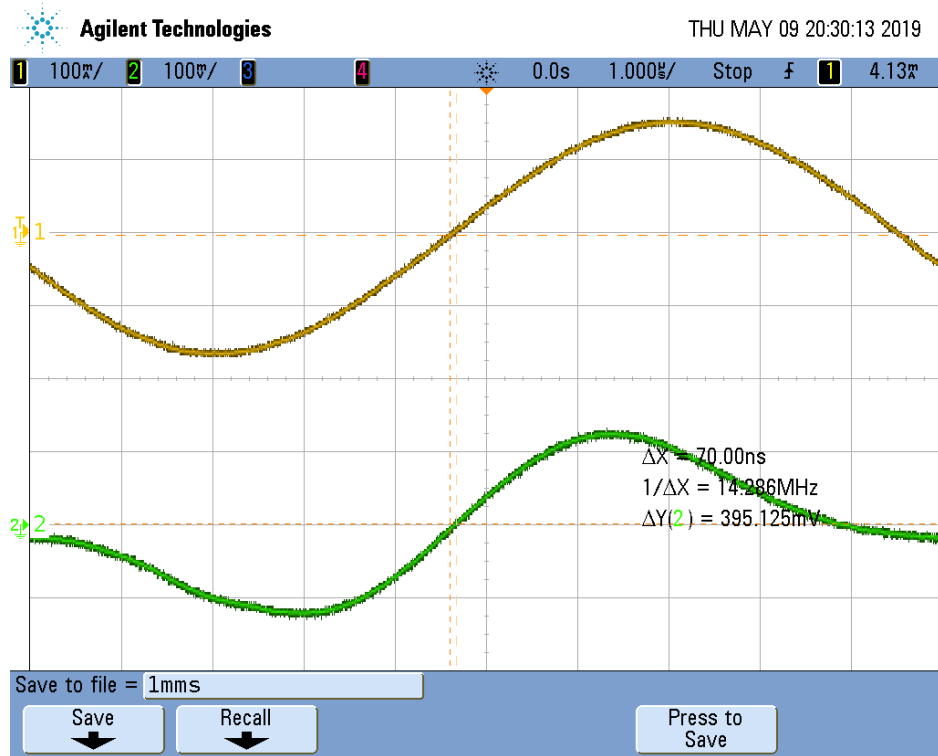
7) Oscilogram  $v = 2 \text{ mm/s}$



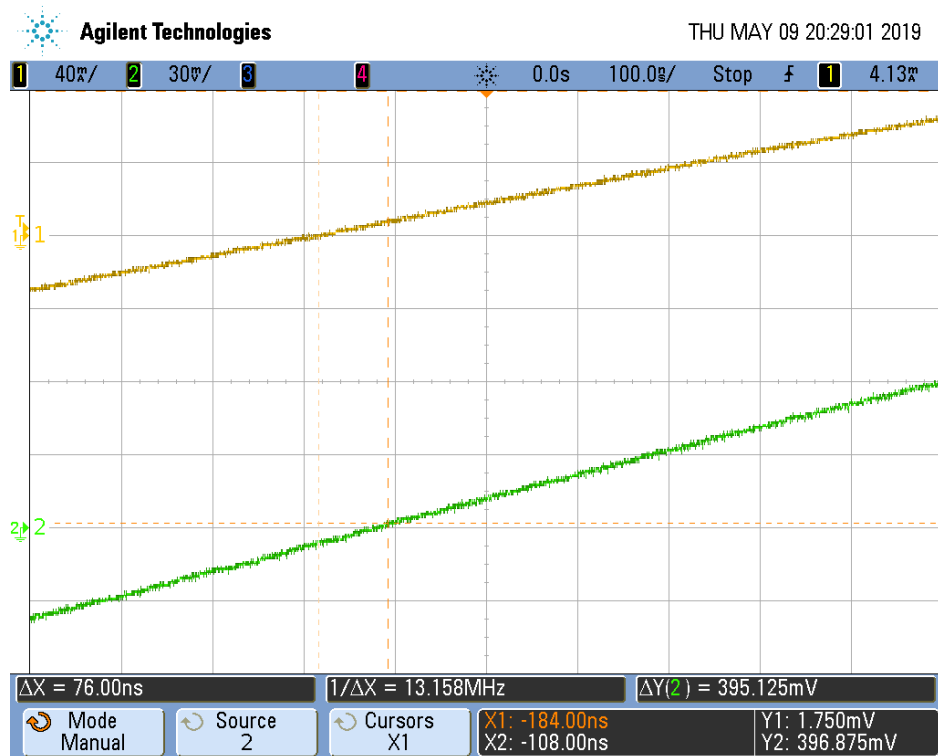
8) Oscilogram  $v = 2 \text{ mm/s}$  (detail)



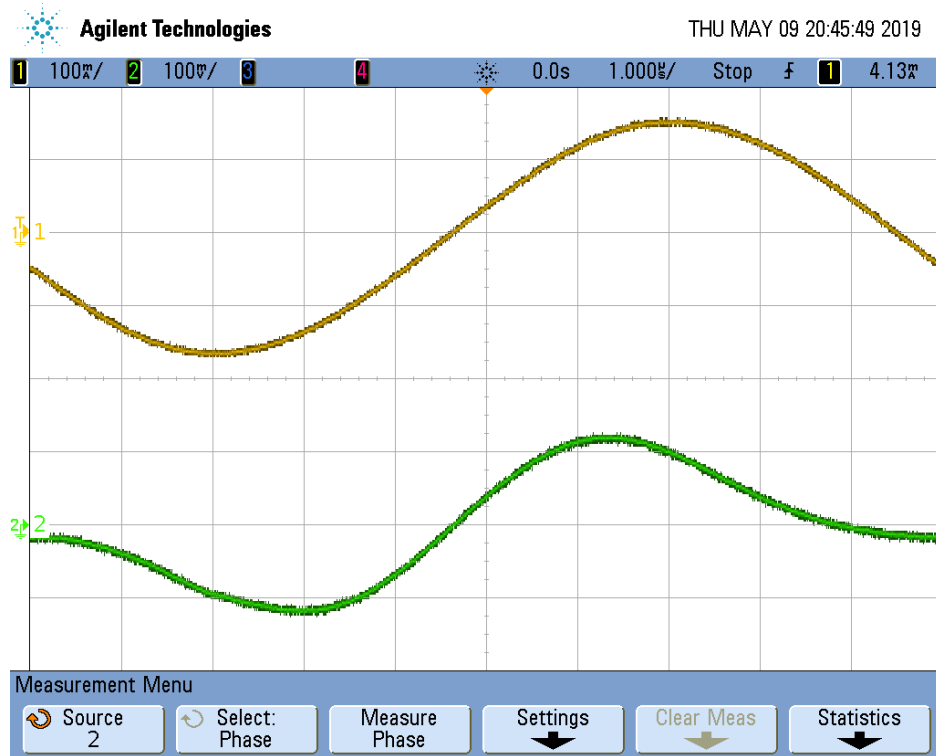
9) Oscilogram  $v = 1 \text{ mm/s}$



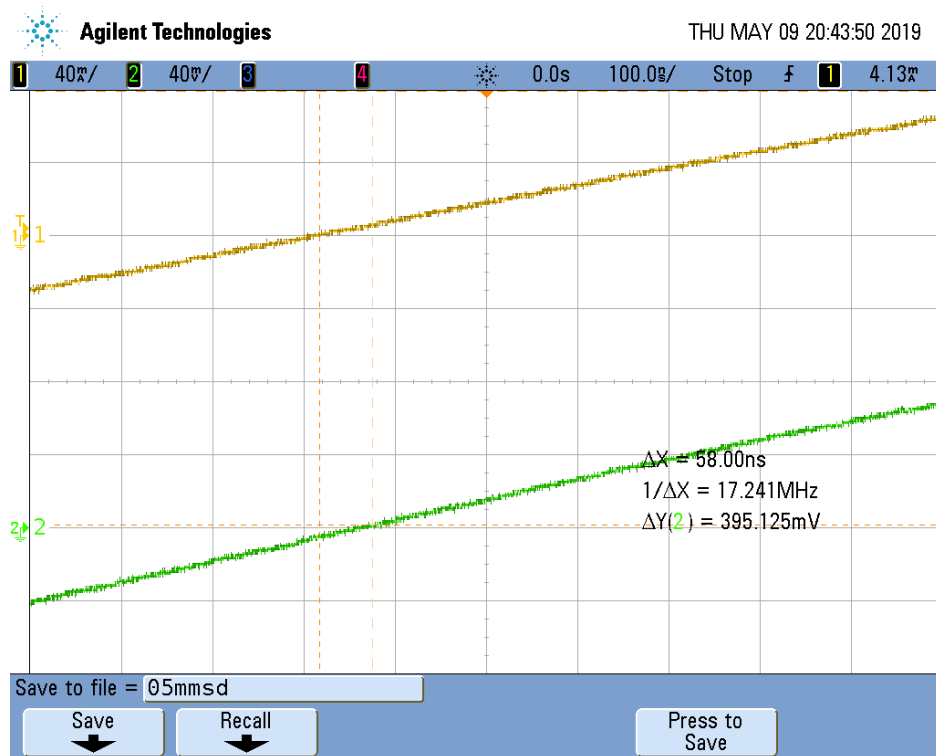
10) Oscilogram  $v = 1 \text{ mm/s}$  (detail)



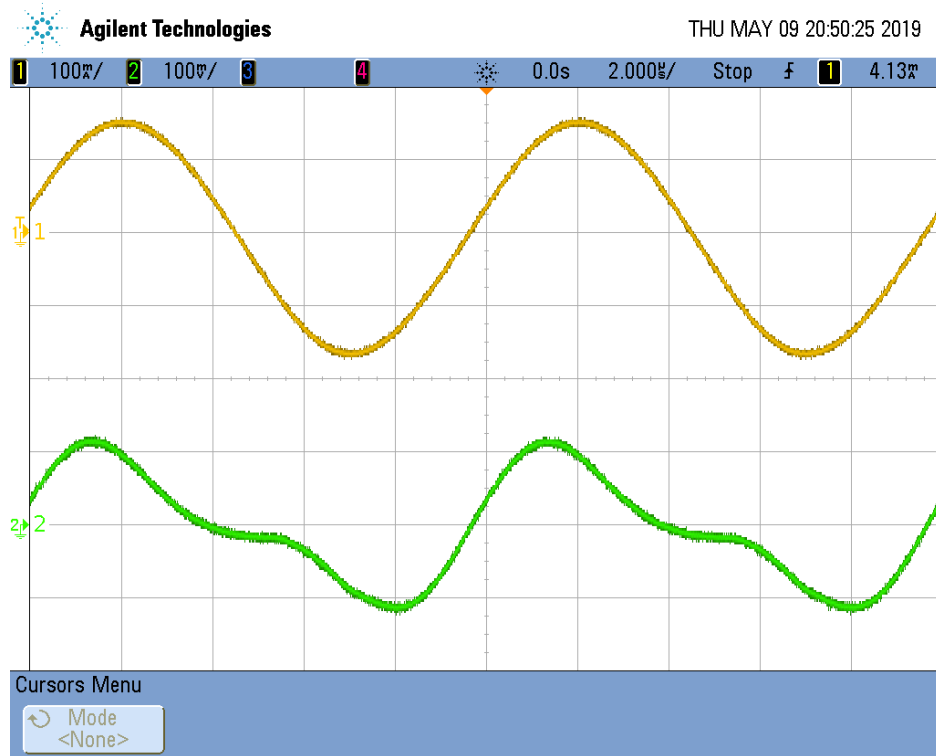
11) Oscilogram  $v = 0,5 \text{ mm/s}$



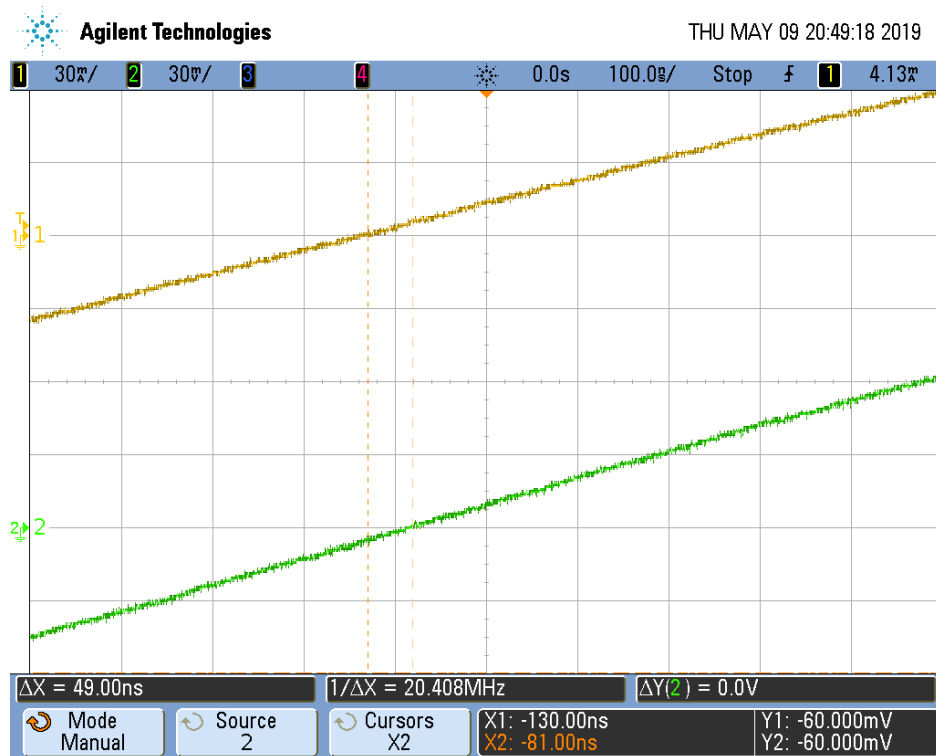
12) Oscilogram  $v = 0,5 \text{ mm/s}$  (detail)



13) Oscilogram  $v = 0,2 \text{ mm/s}$

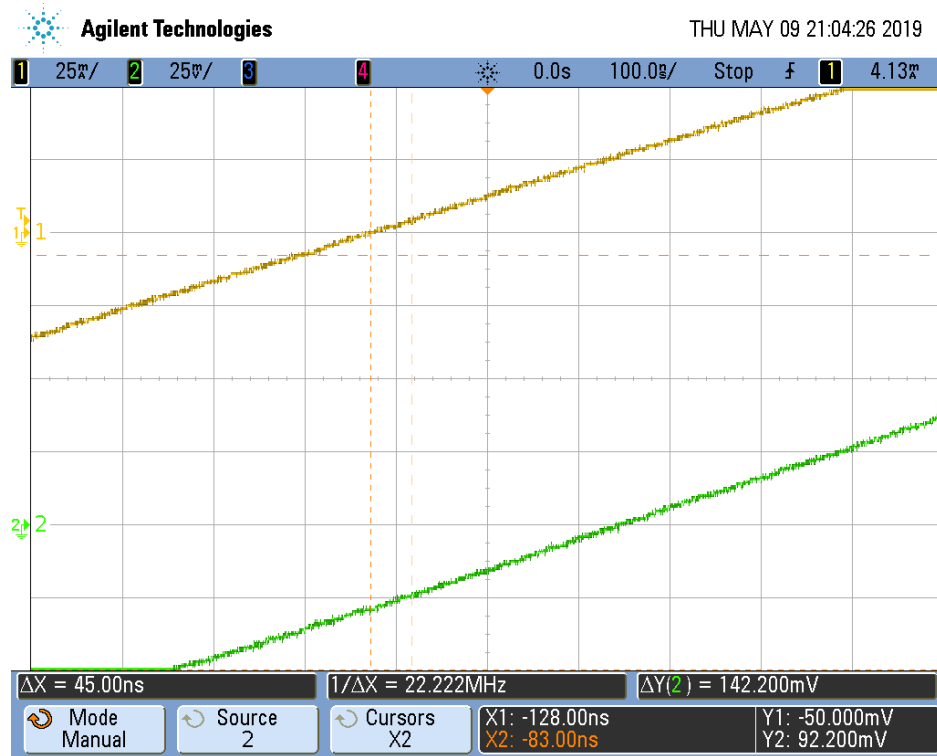


14) Oscilogram  $v = 0,2 \text{ mm/s}$  (detail)



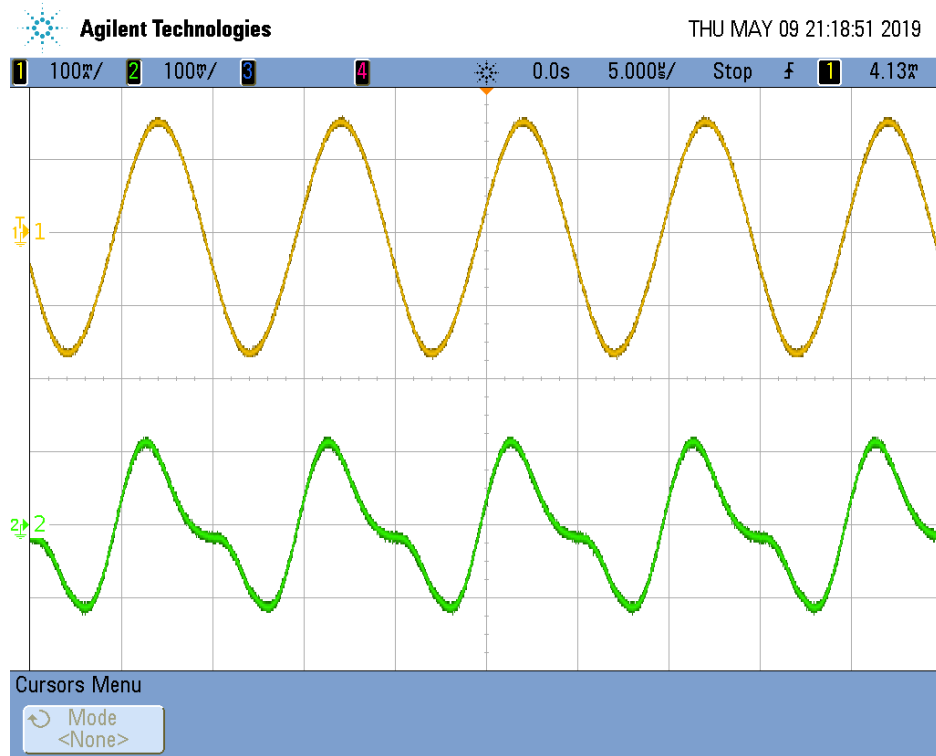


15) Oscilogram  $v = 0,1 \text{ mm/s}$  (detail)

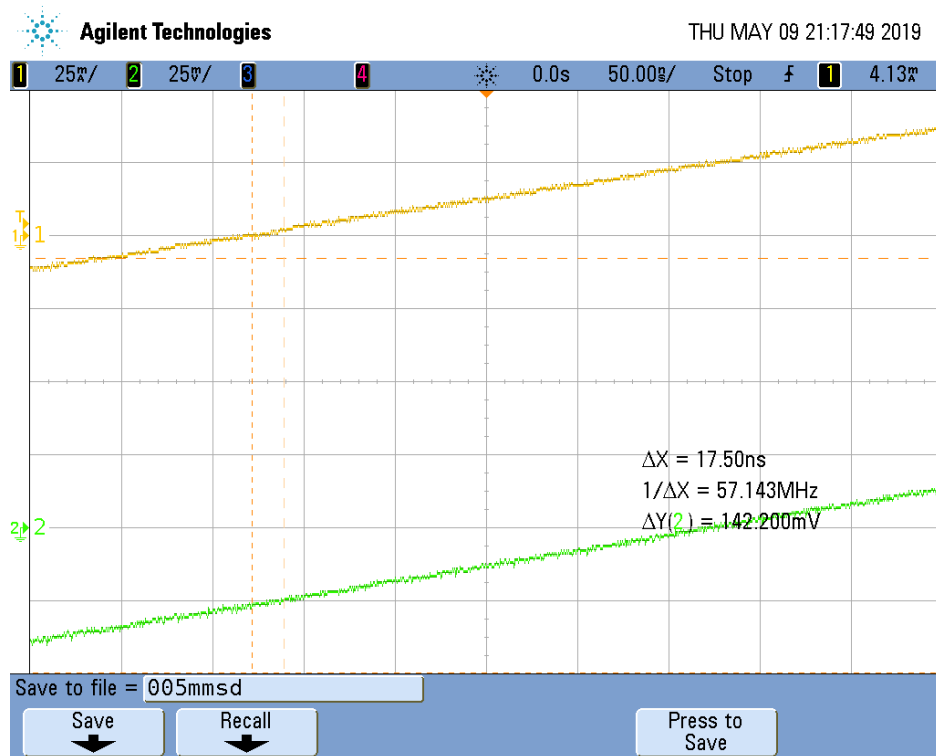


16) Oscilogram  $v = 0,1 \text{ mm/s}$  – nebyl zachycen

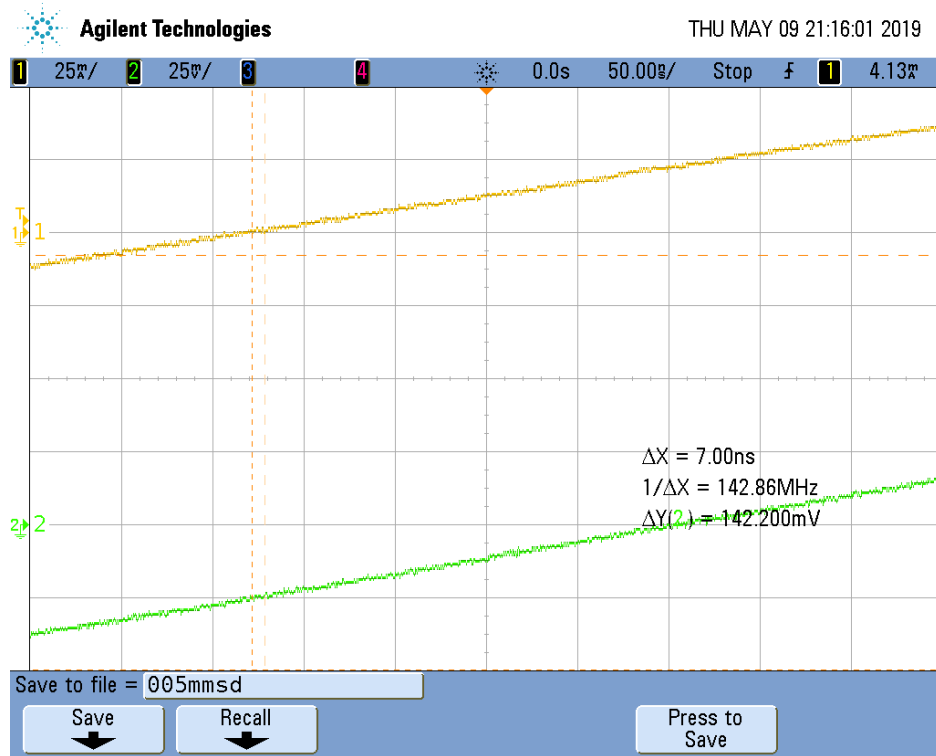
17) Oscilogram  $v = 0,05 \text{ mm/s}$



18) Oscilogram  $v = 0,05 \text{ mm/s}$  (detail)



19) Oscilogram  $v = 0,02 \text{ mm/s}$  (detail)



20) Oscilogram  $v = 0,02 \text{ mm/s}$  – nebyl zachycen

21) Oscilogram  $v = 0,1 \text{ mm/s}$ ,  $d=5 \text{ mm}$

