

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Numerická analýza čidla indukčního měřiče průtoku

Vedoucí práce: Ing. Jan Sedláček, Ph.D.

Autor práce: Petr Polívka

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr POLÍVKA**
Osobní číslo: **E10N0108P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Numerická analýza čidla indukčního měřiče průtoku**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Zpracujte teoretický úvod zaměřený na metody měření průtoku kapalin a metody řešení elektromagnetických polí.
2. Vytvořte geometrický a výpočetní model zadaného čidla indukčního měřiče průtoku.
3. Provedte numerické výpočty magnetického pole v modelu čidla, vypočtené výsledky zhodnoťte.
4. Analyzujte a zpracujte přínosné zdokonalení matematického modelu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Roger C. Baker : Flow Measurement Handbook (Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications), University of Cambridge, ISBN 9780521017657
2. Bejček, L., Ďaďo, S., Platil, A. : Měření průtoku a výšky hladiny, BEN technická literatura, 2005, ISBN 80-7300-156-X
3. Zahraniční odborné publikace
4. Uživatelský manuál a dokumentace ANSYS

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Sedláček, Ph.D.

Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

ANOTACE

Téma: Numerická analýza čidla indukčního měřiče průtoku

Tato diplomová práce se zabývá numerickou analýzou čidla indukčního měřiče průtoku v profesionálním MKP programu ANSYS Multiphysics. V práci je uveden postup při formulaci parametrického 3D modelu čidla v jazyce APDL, dále numerické výsledky pro stacionární magnetické pole, optimalizace magnetického obvodu a také posouzení výhodnosti různých konstrukčních variant čidla (zejména s ohledem na jejich energetickou náročnost, optimálního rozložení magnetického pole a úsporu mědi budících cívek). Též jsou aplikovány základní poznatky z teorie indukčních průtokoměrů umožňující provést tzv. suchou kalibraci čidla, tj. vyhodnotit velikost indukovaného napětí na snímacích elektrodách, či citlivost čidla na různé rychlostní profily měřené kapaliny.

Klíčová slova

Ansyes, APDL, indukční průtokoměr, indukované napětí, elektrostatické pole, laminární proudění, MKP, Matlab, magnetický obvod, magnetické pole, numerická analýza, Poissonova rovnice, průtok, sedlové cívky, skalární potenciál, váhová funkce, virtuální proud

ANNOTATION

Thesis: Numerical Analysis of Induction Flowmeter Sensor

This master thesis is focused on three-dimensional numerical analysis of induction (electromagnetic) flowmeter sensor in professional FEM software ANSYS Multiphysics. The main part of the thesis includes parametric 3D model of sensor in APDL language, numerical results for stationary magnetic field, magnetic circuit optimization and also evaluation of different sensor configurations (in terms of energy consumption, the optimal distribution of magnetic field and the savings of copper). Furthermore, thesis presents methods for dry calibration of the sensor based on theoretical models combining multiple physical phenomena, i.e. methods to determine the voltage induced on sensing electrodes or sensor's sensitivity to different velocity profiles of measured liquid.

Key Words

Ansyes, APDL, Induction flowmeter, Induced voltage, Electrostatic field, Laminar flow, FEM, Matlab, Magnetic circuit, Magnetic field, Numerical analysis, Poisson's equation, Flow rate, Saddle coils, Scalar potential, Weight function, Virtual current

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury a pramenů a že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, byl využit v souladu se všemi autorskými právy.

V Plzni dne 9. 5. 2012

.....

vlastnoruční podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, poskytnutí odborné literatury a za veškeré konzultace spojené s touto diplomovou prací.

V Plzni dne 9. 5. 2012

Autor práce

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

PŘEHLED POUŽITÉ SYMBOLIKY	- 10 -
ÚVOD	- 12 -
1 METODY MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN A PLYNŮ	- 13 -
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE	- 13 -
1.1.1 Hmotnostní a objemový průtok	- 13 -
1.1.2 Proudnice	- 14 -
1.1.3 Zákon zachování toku (rovnice kontinuity)	- 15 -
1.1.4 Bernoulliho rovnice	- 15 -
1.1.5 Viskozita	- 16 -
1.1.6 Reynoldsovo číslo	- 16 -
1.1.7 Laminární proudění	- 17 -
1.1.8 Turbulentní proudění	- 18 -
1.1.9 Rychlostní profily pro účely numerické analýzy čidla	- 19 -
1.2 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ PRŮTOKOMĚŘŮ	- 21 -
1.3 OVÁLOVÝ PRŮTOKOMĚŘ	- 23 -
1.4 PÍSTOVÁ MĚŘIDLA PRŮTOKU	- 24 -
1.5 RYCHLOSTNÍ SONDY	- 25 -
1.6 PRŮŘEZOVÉ PRŮTOKOMĚŘY	- 26 -
1.7 ROTAMETRY - PRŮTOKOMĚŘY S PROMĚNNÝM PRŮŘEZEM	- 29 -
1.8 ULTRAZVUKOVÉ PRŮTOKOMĚŘY	- 31 -
1.8.1 Ultrazvukový průtokoměr - typ Transit Time (přímý impulzní)	- 31 -
1.9 DEFORMAČNÍ (NÁPOROVÉ) PRŮTOKOMĚŘY	- 34 -
1.10 TURBÍNOVÉ A LOPATKOVÉ PRŮTOKOMĚŘY	- 36 -
1.11 CORIOLISOVY HMOTNOSTNÍ PRŮTOKOMĚŘY	- 38 -
1.12 TEPELNÉ HMOTNOSTNÍ PRŮTOKOMĚŘY	- 40 -
1.12.1 Kalorimetrický hmotnostní průtokoměr	- 40 -
1.12.2 Hmotnostní termoanemometr	- 42 -

2	METODY ŘEŠENÍ ELEKTROMAGENTICKÝCH POLÍ	- 44 -
2.1	METODA KONEČNÝCH DIFERENCÍ - MKD	- 44 -
2.2	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ - MKP.....	- 46 -
2.2.1	Matematický princip metody konečných prvků.....	- 47 -
2.2.2	Algoritmus metody konečných prvků pro 2D okrajovou úlohu	- 48 -
2.2.3	Porovnání MKP a MKD, adaptivní algoritmy vytváření sítě	- 50 -
3	INDUKČNÍ (ELEKTROMAGNETICKÉ) MĚŘIČE PRŮTOKU	- 51 -
3.1	PRINCIP INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU	- 51 -
3.2	ZÁKLADNÍ ČÁSTI ČIDLA INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU	- 52 -
3.2.1	Zdroj magnetického pole	- 53 -
3.2.2	Měřicí trubice	- 54 -
3.2.3	Snímací elektrody	- 55 -
3.3	MĚŘICÍ OBVODY INDUKČNÍCH PRŮTOKOMĚRŮ.....	- 56 -
3.3.1	Rušivé složky měřeného signálu.....	- 56 -
3.3.2	Způsoby buzení magnetického pole indukčního průtokoměru	- 57 -
3.3.3	Lichoběžníkový průběh magnetické indukce $B(t)$	- 58 -
3.3.4	Zemnění čidla indukčního průtokoměru.....	- 59 -
3.4	APLIKACE A VLASTNOSTI INDUKČNÍCH PRŮTOKOMĚRŮ.....	- 60 -
4	NUMERICKÁ ANALÝZA MAGNETICKÉHO OBVODU ČIDLA INDUKČNÍHO MĚŘIČE PRŮTOKU V PROGRAMU ANSYS	- 61 -
4.1	MULTIFYZIKÁLNÍ PROGRAM ANSYS.....	- 61 -
4.1.1	Postup při řešení konečně prvkové úlohy v programu Ansys	- 62 -
4.1.2	APDL - Ansys Parametric Design Language	- 62 -
4.2	CAD MODEL ČIDLA INDUKČNÍHO MĚŘIČE PRŮTOKU	- 63 -
4.3	GEOMETRIE NUMERICKÉHO MODELU ČIDLA V PROGRAMU ANSYS.....	- 65 -
4.4	NUMERICKÝ A MATEMATICKÝ MODEL ČIDLA V PROGRAMU ANSYS	- 67 -
4.5	VÝSLEDKY NUMERICKÉ ANALÝZY STACIONÁRNÍHO MAGNETICKÉHO POLE ČIDLA INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU.....	- 71 -

4.5.1	Vyhodnocení rozložení stacionárního magnetického pole v čidle DN80	- 71 -
4.5.2	Prostorové rozložení stacionárního magnetického pole v čidle DN80	- 75 -
4.6	OPTIMALIZACE ČIDLA DN80 S VNITŘNÍM MAG. OBVODEM	- 79 -
4.7	ČIDLO DN80 S VNĚJŠÍM MAGNETICKÝM OBVODEM	- 81 -
4.8	ČIDLO DN80 SE SEDLOVÝMI BUDICÍMI CÍVKAMI	- 83 -
4.9	POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT ČIDLA DN80	- 85 -
5	SUCHÁ KALIBRACE ČIDLA - NUMERICKÁ ANALÝZA	
	INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ NA SNÍMACÍCH ELEKTRODÁCH	- 87 -
5.1	ZÁKLADNÍ ROVNICE ČIDLA INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU	- 87 -
5.2	POSTUP PŘI ŘEŠENÍ POISSONOVY ROVNICE PRO EL. POTENCIÁL	- 88 -
5.3	VÝSLEDKY ŘEŠENÍ POISSONOVY ROVNICE PRO EL. POTENCIÁL	- 90 -
5.4	CITLIVOST ÚDAJE ČIDLA NA ASYMETRICKÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL	- 92 -
5.5	TEORIE VÁHOVÝCH FUNKCÍ ČIDLA INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU	- 94 -
5.5.1	Váhové funkce čidla - metoda virtuálního proudu	- 98 -
5.5.2	Výpočet váhové funkce pomocí metody virtuálního proudu	- 99 -
5.5.3	Výpočet indukovaného el. napětí pomocí analytické váhové funkce	- 103 -
5.6	VYHODNOCENÍ SUCHÉ KALIBRACE ČIDLA DN80	- 105 -
	ZÁVĚR	- 107 -
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 109 -
	INTERNETOVÉ ODKAZY	- 110 -
	SEZNAM PŘÍLOH K DIPLOMOVÉ PRÁCI	- 111 -

PŘEHLED POUŽITÉ SYMBOLIKY - 1

Symbol	Jednotka	Veličina
β	$[-]$	Poměr průměrů kruhových ploch
γ	$[S \cdot m^{-1}]$	Elektrická vodivost
ε	$[-, F \cdot m^{-1}]$	Expanzní součinitel, permitivita
$\varepsilon_0, \varepsilon_r$	$[F \cdot m^{-1}, -]$	Permitivita vakua, relativní permitivita
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota tekutiny
η	$[Pa \cdot s]$	Dynamická viskozita tekutiny
μ	$[H \cdot m^{-1}]$	Permeabilita
μ_0, μ_r	$[H \cdot m^{-1}, -]$	Permeabilita vakua, relativní permeabilita
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita tekutiny
φ	$[rad, V]$	Úhlová polární souřadnice, elektrický skalární potenciál
φ_g, φ_m	$[A]$	Magnetický skalární potenciál
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	Úhlová rychlost
Δ	$[-]$	Laplaceův operátor
∇	$[-]$	Nabla operátor
A	$[s^2 \cdot K^2 \cdot J^{-2}]$	Konstanta kalorimetrického průtokoměru
a_c	$[m \cdot s^{-2}]$	Coriolisovo zrychlení
B	$[T]$	Magnetická indukce
c	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost šíření signálu
c_p	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita
C_p, C_r	$[-]$	Průtokové součinitele
d	$[m]$	Průměr kapiláry
D	$[m]$	Průměr potrubí, průměr průtočného průřezu
E	$[V \cdot m^{-1}]$	Elektrická intenzita
F_e	$[N]$	Síla vyvolaná působením elektrického pole
F_D	$[N]$	Deformační síla
F_m	$[N]$	Síla vyvolaná působením mag. pole
ΔF_C	$[N]$	Coriolisova síla působící na element tekutiny
g	$[m \cdot s^{-2}]$	Tíhové zrychlení
h	$[m]$	Výška, poloha tělíska rotametru
H	$[A \cdot m^{-1}]$	Intenzita magnetického pole
i_b, I_b	$[A]$	Budicí proud
J, J_S	$[A \cdot m^{-2}]$	Proudová hustota

PŘEHLED POUŽITÉ SYMBOLIKY - 2

Symbol	Jednotka	Veličina
j_v	$[A \cdot m^{-2}]$	Proudová hustota virtuálního proudu
k_h	$[-]$	Hydraulický korekční činitel
k_t	$[-]$	Součinitel tvaru terčíku
L	$[m]$	Vzdálenost senzorů ultrazvukového průtokoměru
$m, \Delta m$	$[kg]$	Hmotnost, element hmotnosti tekutiny
$\Delta M, M$	$[N \cdot m]$	Moment Coriolisovy síly
p	$[Pa]$	Tlak
p_c	$[Pa]$	Celkový tlak
p_d	$[Pa]$	Dynamický tlak
p_h	$[Pa]$	Hydrostatický tlak
p_s	$[Pa]$	Statický tlak
P_E	$[W]$	Příkon topného vinutí
q	$[C]$	Elektrický náboj
Q_m	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní průtok tekutiny
Q_V	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	Objemový průtok tekutiny
r	$[m]$	Rádus, radiální polární souřadnice
R_e, R_{eD}	$[-]$	Reynoldsovo číslo
R	$[m]$	Poloměr průtočného průřezu
S, S_p	$[m^2]$	Průtočný průřez
S_T	$[m^2]$	Plocha terčíku
v	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost proudění tekutiny
\bar{v}, \bar{V}	$[m \cdot s^{-1}]$	Střední rychlost proudění tekutiny
V_0	$[m \cdot s^{-1}]$	Osová rychlost tekutiny v potrubí
u_{rsa}	$[V]$	Asynchronní rušivá složka napětí
u_{rss}	$[V]$	Synchronní rušivá složka napětí
u_{ms}	$[V]$	Měřený signál indukčního průtokoměru
u_{us}	$[V]$	Užitečný signál indukčního průtokoměru
U_{rss}	$[V]$	Složka rušivých stejnosměrných napětí
$\Delta U, \Delta \varphi$	$[V]$	Indukované napětí, rozdíl potenciálů
W, W_z	$[-]$	Váhová funkce čidla

Pozn.: Symboly zvýrazněné tučným písmem znázorňují vektory příslušných veličin.

ÚVOD

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvořit numerický model pro trojdimenzionální výpočetní analýzu magnetického obvodu čidla indukčního měřiče průtoku v profesionálním konečně prvkovém programu Ansys Multiphysics. V rámci práce byly posuzovány různé konfigurace čidla, především s ohledem na jejich energetickou náročnost, optimální rozložení mag. pole a úsporu mědi budících cívek. Numerické modely jednotlivých variant byly v programu Ansys vytvářeny parametricky, prostřednictvím programových skriptů s příkazy jazyku APDL (Ansys Parametric Design Language). Tento přístup umožnil provedení optimalizačních výpočtů a především snadnou práci s výslednými numerickými daty.

Pomocí získaných hodnot magnetické indukce v průtočném průřezu čidla bylo možné realizovat tzv. "suchou kalibraci", tj. určit velikost indukovaného napětí na snímacích elektrodách, či vyhodnotit citlivost čidla na různé rychlostní profily měřené kapaliny. Byly aplikovány dva odlišné přístupy numerické analýzy: přímé řešení Poissonovy rovnice pro rozložení elektrického potenciálu a metoda tzv. váhové funkce čidla. Veškeré obdržené výsledky byly vždy podrobeny důkladnému rozboru s důrazem na fyzikální podstatu řešené problematiky.

Text diplomové práce je po logické stránce uspořádán do pěti kapitol. První kapitola poskytuje přehled metod a přístrojů používaných k měření průtoku a proteklého množství tekutin. Pojednává o objemových měřidlech a o rychlostních a hmotnostních průtokoměrech, popisuje principy a vlastnosti jednotlivých typů zařízení a senzorů a uvádí jejich přednosti, nedostatky a možnosti použití. Ve druhé kapitole jsou stručně nastíněny dvě základní numerické metody pro řešení elektromagnetických polí - metoda konečných diferencí (MKD) a metoda konečných prvků (MKP). Třetí kapitola obsahuje detailní informace o indukčních průtokoměrech, resp. o analyzovaném čidlu, které tvoří primární část těchto měřidel průtoku.

Předposlední kapitola zahrnuje vlastní numerické analýzy magnetického pole v programu Ansys Multiphysics, závěrečná kapitola pak "suchou kalibraci" čidla. Obě kapitoly mají stejnou koncepci, nejdříve jsou uvedeny základní informace a teoretické poznatky, matematické a numerické modely, použité algoritmy a metody řešení. Posléze je provedena diskuze a interpretace získaných numerických, resp. grafických výsledků.

1 METODY MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN A PLYNŮ

Pro měření průtoku a proteklého množství kapalin a plynů existuje mnoho typů průtokoměrů využívajících celou řadu odlišných fyzikálních principů a konstrukčních řešení. Je to dáno především rozdílností chemického složení a fyzikálních vlastností měřených tekutin, různorodostí pracovních podmínek a širokým spektrem aplikací: od měření průtoku krve až po měření rychlosti proudění říčních toků nebo mořských proudů.

Význam měření průtoku je nesporný. Průtokoměry poskytují informace o toku média, které jsou nezbytné pro bilance během technologických procesů, pro kalkulace cen proteklého množství různorodých komodit (jako jsou ropa, zemní plyn, voda apod.), pro regulační pochody, pro bilanční měření kontaminací apod. Průtokoměry jsou tedy nedílnou součástí většiny průmyslových odvětví.

1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

1.1.1 Hmotnostní a objemový průtok

Výsledek měření průtoku může být udáván buď jako průtok hmotnostní Q_m (např. v jednotkách $kg \cdot s^{-1}$, v $t \cdot h^{-1}$ apod.) nebo objemový Q_V (např. v jednotkách $m^3 \cdot s^{-1}$, v $l \cdot h^{-1}$ apod.). Pro stacionární (v čase neměnné) průtoky platí základní vztahy

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad Q_V = \frac{V}{t} \quad (1.1)$$

V případě nestacionárních průtoků, kde dochází k časovým změnám, je nutné vycházet z definic pro okamžité hodnoty průtoků

$$Q_m(t) = \frac{dm(t)}{dt} \quad Q_V(t) = \frac{dV(t)}{dt} \quad (1.2)$$

Některé průtokoměry jsou vybaveny integračním zařízením (např. vodoměry nebo plynoměry), takže udávají proteklé množství (hmotnost m nebo objem V) tekutiny za určitý časový úsek

$$m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m(t) dt \quad V = \int_{t_1}^{t_2} Q_V(t) dt \quad (1.3)$$

Objemový průtok lze vyhodnotit na základě měření místní nebo střední rychlosti tekutiny proudící potrubím o známém průřezu podle vztahu

$$Q_V = \int_S v dS = \bar{V} \cdot S \quad (1.4)$$

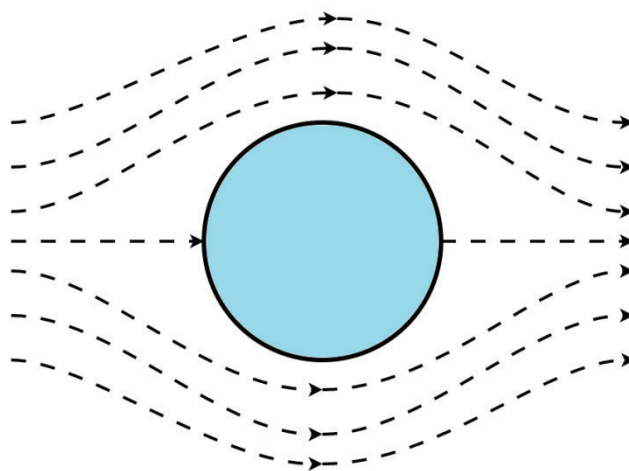
$v [m \cdot s^{-1}]$ představuje místní rychlost tekutiny, $\bar{V} [m \cdot s^{-1}]$ střední hodnotu rychlosti proudění v potrubí a $S [m^2]$ průřez potrubí. V případě konstantní hustoty ρ lze hmotnostní průtok Q_m určit z objemového průtoku výpočtem součinu

$$Q_m = \rho \cdot Q_V = \rho \cdot \bar{V} \cdot S \quad (1.5)$$

Většina průtokoměrů udává průtok či proteklé množství při daných provozních podmínkách, tj. např. pro danou teplotu a tlak. Při proměnných podmínkách je nutné provádět korekci, o kterou se zpravidla starají elektronické obvody průtokoměru. Současný trend vývoje průtokoměrů je zaměřen na přímé měření hmotnostního průtoku, tj. měření nezávislé na teplotě, tlaku a viskozitě měřené tekutiny. [6]

1.1.2 Proudnice

Proudnice (též proudové čáry) jsou analogií k siločarám elektromagnetického pole, používají se ke grafickému zobrazení proudění tekutiny. Proudnice určují trajektorii pohybu jednotlivých částic, přičemž rychlost každé částice v libovolném místě má směr tečny k proudnici. Proudnice se nemohou navzájem protínat a každým bodem proudící tekutiny prochází právě jedna proudnice.



Obr. 1.1 Rozložení proudnic okolo překážky válcového tvaru

1.1.3 Zákon zachování toku (rovnice kontinuity)

Zákon zachování toku je vyjádřením obecného fyzikálního zákona zachování hmoty. Jestliže potrubím protéká nestlačitelná tekutina ($\rho = konst.$), musí být hmotnostní průtok Q_m v libovolném místě konstantní. Tekutina se nemůže nikde akumulovat ani ztrácet. Matematickou formulací tohoto zákona je rovnice kontinuity

$$Q_{m1} = Q_{m2} = Q_{mi} \rightarrow \rho \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho \cdot S_2 \cdot v_2 = \rho \cdot S_i \cdot v_i$$

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = S_i \cdot v_i = Q_{Vi} = konst. \quad (1.6)$$

kde $S_i [m^2]$ a $v_i [m \cdot s^{-1}]$ je průtočný průřez respektive rychlost v libovolném místě potrubí. Je zřejmé, že pro $S_1 > S_2$ musí platit $v_1 < v_2$ a naopak.

1.1.4 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vyjadřuje všeobecně platný fyzikální zákon zachování energie pro případ proudění tekutiny potrubím. Celková mechanická energie elementu nestlačitelné proudící tekutiny ($\rho = konst.$) o objemu dV v libovolném místě potrubí musí být konstantní. Její velikost je dána součtem kinetické (pohybové), potenciální tlakové a potenciální tíhové energie

$$dE_m = dE_k + dE_{pP} + dE_{ph} = konst.$$

$$dE_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot dV \cdot v^2 + p \cdot dV + \rho \cdot dV \cdot g \cdot h = konst. \quad (1.7)$$

Vztažením rovnice (1.7) na jednotku objemu získáváme Bernoulliho rovnici

$$\frac{dE_m}{dV} = p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = p_c = p_d + p_s = konst.$$

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad p_s = p + p_h = p + \rho gh \quad (1.8)$$

kde člen p_d představuje dynamický tlak, člen p_s statický tlak a člen p_h tlak hydrostatický.

Z rovnice kontinuity (1.6) vyplývá, že zúžením průřezu potrubí dochází k nárůstu rychlosti proudění tekutiny a tedy i jejího dynamického tlaku. Zvýšení dynamického tlaku se na základě Bernoulliho rovnice musí projevit poklesem tlaku statického. Ten může poklesnout až pod hodnotu okolního atmosférického tlaku, čímž vzniká podtlak, který

může být využit k nasávání jiné tekutiny do potrubí. Tuto skutečnost využívají například rozprašovače, natěračské pistole nebo karburátory.

Z Bernoulliho rovnice (1.8) je dále patrné, že měřením tlaků lze získat údaj o rychlosti proudění. Dynamický tlak může být určen z rozdílu statických tlaků před a za přepážkou (průtokoměry se škrťacími clonami) nebo z rozdílu celkového a statického tlaku, který měří např. rychlostní sondy - Pitotova a Prandtlůva trubice (podrobněji o těchto typech průtokoměrů pojednávají podkapitoly 1.5 a 1.6).

1.1.5 Viskozita

Vnitřní tření v tekutině charakterizuje tzv. dynamická (absolutní) viskozita η [$Pa \cdot s$]. Její hodnota závisí především na velikosti přitažlivých sil mezi částicemi, a též na teplotě, v případě plynů i tlaku. Převrácená hodnota viskozity se nazývá *tekutost*. V pohybových rovnicích vazkých tekutin a v Reynoldsově čísle vystupuje tzv. kinematická viskozita definovaná jako podíl dynamické viskozity a hustoty tekutiny

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (1.9)$$

Viskozita má zásadní význam při měření průtoků, jelikož ovlivňuje rychlostní profil tekutiny v potrubí, viz definice Reynoldsova čísla. Viskozita se měří pomocí viskozimetrů a pro většinu tekutin je její hodnota tabelována.

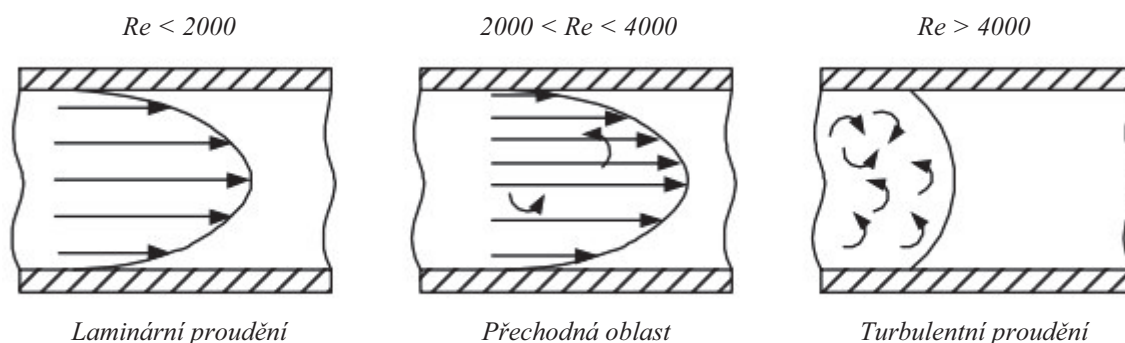
1.1.6 Reynoldsovo číslo

Funkce průtokoměru je zásadně ovlivněna druhem proudění tekutiny v potrubí. Povahu proudění určuje rozložení třecích a setrvačných sil v tekutině, respektive jejich poměr, tzv. Reynoldsovo číslo R_{eD}

$$R_{eD} = \frac{\text{setrvačné síly}}{\text{třecí síly}} = \frac{\rho \bar{V}^2 D}{\eta \bar{V}} = \frac{\rho \bar{V} D}{\eta} = \frac{\bar{V} D}{\nu} \quad [-] \quad (1.10)$$

Označení D v indexu vyjadřuje, že Reynoldsovo číslo je vztaženo k průměru potrubí průtokoměru. Druhý člen na pravé straně rovnice (1.10) se používá u kapalin, jejichž kinematická viskozita závisí pouze na teplotě. Třetí člen se používá u plynů, u nichž je viskozita funkcí teploty a tlaku. Na základě velikosti Reynoldsova čísla je možné určit, zdali se jedná o laminární nebo turbulentní proudění tekutiny. [2]

Rozhraní mezi laminárním a turbulentním prouděním udává tzv. kritické Reynoldsovo číslo R_{Dkrit} , jehož teoretická hodnota pro kruhové potrubí dosahuje čísla 2320. Je-li $Re_D < 2320$ jedná se o proudění laminární, při $Re_D > 2320$ jde o proudění turbulentní. Ve skutečnosti je v okolí R_{Dkrit} určitá přechodná oblast (viz Obr. 1.2) s asymetrickým rychlostním profilem, ve které nelze o druhu proudění jednoznačně rozhodnout, tato oblast spadá přibližně do intervalu $2000 < Re_D < 4000$. [2]



Obr. 1.2 Rychlostní profil pro laminární a turbulentní proudění [4]

1.1.7 Laminární proudění

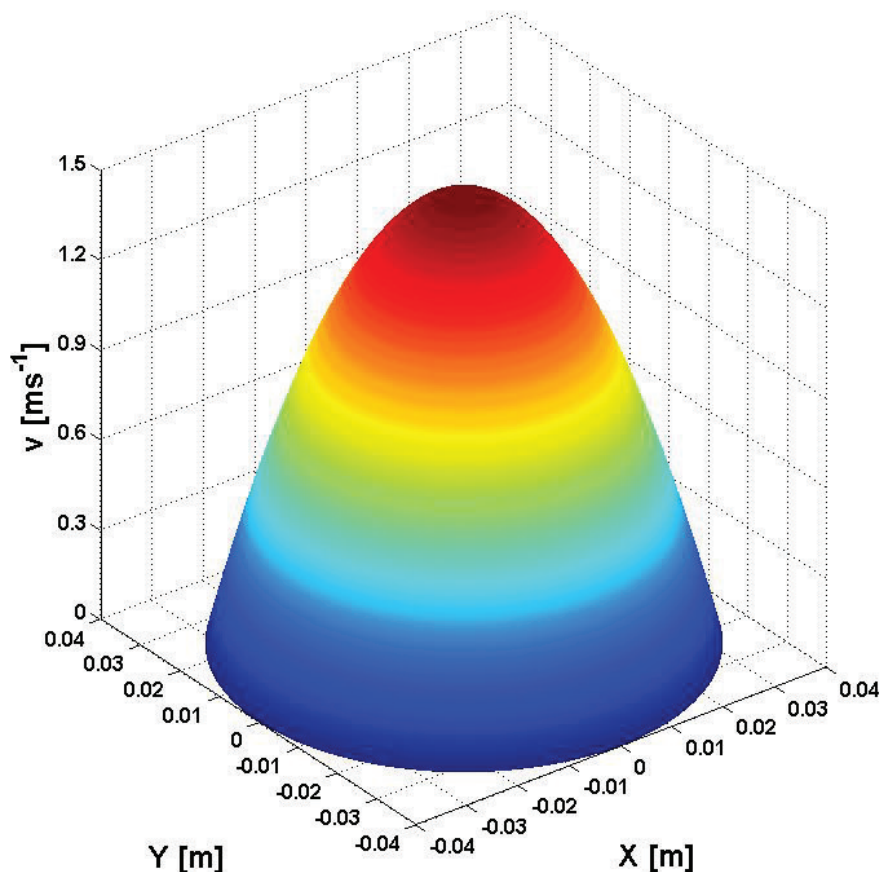
Při laminárním proudění převládá účinek třecích sil. Částice tekutiny se pohybují vedle sebe ve vrstvách, tzv. laminách, které se vzájemně nemísí. Rychlost proudění je rozdělena parabolicky s největší rychlostí v ose potrubí a nejmenší na místě styku hraničních vrstev s vnitřními stěnami potrubí, kde jsou účinky třecích sil největší. Vzniká tak tzv. úplně vyvinutý rychlostní profil ve tvaru rotačního osově symetrického paraboloidu (viz Obr. 1.3), který je možné popsat následující rovnicí

$$V(r, \varphi) = V_0 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (1.11)$$

kde $V_0 [m \cdot s^{-1}]$ je rychlost proudění v ose potrubí (tj. maximální rychlost), $R [m]$ představuje poloměr potrubí a $r [m]$ je radiální souřadnice libovolného bodu z intervalu $\langle 0, R \rangle$. Je zřejmé, že pro $r = R$ nabývá rovnice (1.11) nulové hodnoty. Střední hodnota rychlosti v potrubí dosahuje 67% osové rychlosti V_0 , jak ukazuje následující výpočet

$$\bar{V} = \frac{\int_0^R V(r, \varphi) dr}{R} = \frac{2}{3} V_0 \rightarrow V(r, \varphi) = \frac{3}{2} \bar{V} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (1.12)$$

Laminární proudění je typické pro viskózní tekutiny a malé rychlosti proudění. [1][2]



Obr. 1.3 Grafické zobrazení rychlostního profilu laminárního proudění - $\bar{V} = 1 \text{ ms}^{-1}$, $V_0 = 1,5 \text{ ms}^{-1}$
 $R = 0,04 \text{ m}$, $v = fce(x,y)$

1.1.8 Turbulentní proudění

Při *turbulentním* proudění dochází ke křížení drah částic tekutiny, vytváří se víry (turbulence) a chaotický pohyb tekutiny nepřispívající průtoku. Uplatňují se především účinky setrvačných sil, tekutina proudí ve většině průtočného průřezu téměř stejnou rychlostí, výsledný rychlostní profil je tedy plochý (viz Obr. 1.4 str. 20). Turbulentní proudění se objevuje při větších rychlostech proudění a u tekutin s menší přitažlivou silou mezi částicemi. [2]

Rychlostní profil turbulentního proudění je matematicky popsán mocninou funkcí

$$V(r, \varphi) = V_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (1.13)$$

$V_0 [m \cdot s^{-1}]$ představuje opět rychlost proudění v ose potrubí. Hodnota exponentu n je závislá na velikosti Reynoldsova čísla. Experimentální výsledky udávají např. pro $Re_D = 4 \cdot 10^3$ hodnotu $n = 6$ a pro $Re_D = 1,1 \cdot 10^5$ pak $n = 7$. Přibližně je možné n určit z rovnice (1.14), jež je uvedena na následující straně.

Vztah pro výpočet exponentu $n(R_{eD})$ turbulentního proudění

$$n(R_{eD}) = \frac{1}{0,2525 - 0,0229 \cdot \log(R_{eD})} \quad (1.14)$$

Pro turbulentní rychlostní profil je také příznačné, že poměr rychlosti v bodě $r = 3/4R$ ku střední hodnotě rychlosti \bar{V} je přibližně roven jedné bez ohledu na velikost R_{eD} . Toho lze například využít při měření objemového průtoku Pitotovou trubicí. [1][4]

Střední hodnota rychlosti proudění je určena vztahem

$$\frac{\bar{V}}{V_0} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (1.15)$$

A tedy po dosazení rovnice (1.15) do funkce (1.13) získáváme matematické vyjádření rychlostního profilu turbulentního proudění pro zvolenou střední hodnotu rychlosti

$$V(r, \varphi) = \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2} \bar{V} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (1.16)$$

1.1.9 Rychlostní profily pro účely numerické analýzy čidla

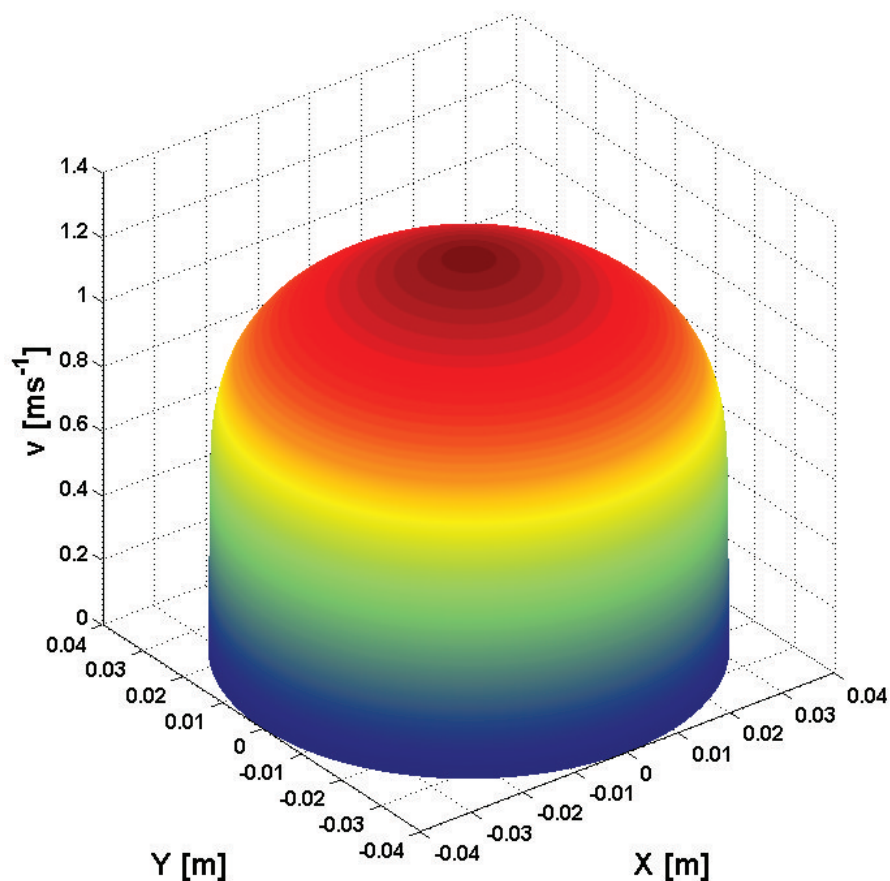
Pro $n = 7$, $\bar{V} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a pro poloměr potrubí $R = 0,04 \text{ m}$ nabývá funkce (1.16) tvaru

$$V(r, \varphi) = 1,22 \cdot \left(1 - \frac{r}{0,04}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (1.17)$$

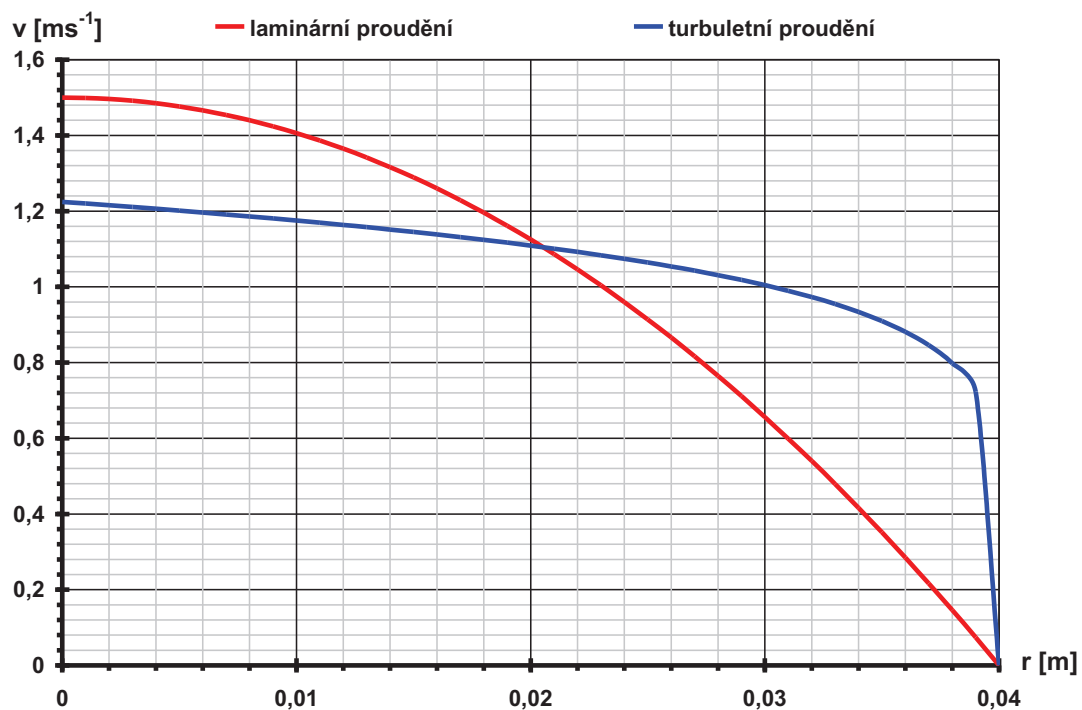
Pro střední hodnotu rychlosti $\bar{V} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ má funkce pro laminární proudění tvar

$$V(r, \varphi) = 1,5 \left[1 - \left(\frac{r}{0,04}\right)^2\right] \quad (1.18)$$

Analytické funkce (1.17) a (1.18), jejichž grafy ilustrují Obr. 1.3 a Obr. 1.4, resp. Obr. 1.5, byly použity pro numerické výpočty distribuce el. potenciálu v průtočném průřezu řešeného čidla indukčního průtokoměru, a také v rámci výpočetních analýz založených na teorii váhových funkcí, podrobněji viz kap. 5 str. 87 až 105.



Obr. 1.4 Grafické zobrazení rychlostního profilu turbulentního proudění - $\bar{V} = 1 \text{ ms}^{-1}$, $V_0 = 1,22 \text{ ms}^{-1}$, $R = 0,04 \text{ m}$, $Re_D = 1,1 \cdot 10^5$, $n = 7$, $v = f_{ce}(x,y)$



Obr. 1.5 Grafické porovnání průběhů rychlostních profilů laminárního a turbulentního proudění podle rovnic (1.17) a (1.18)

1.2 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ PRŮTOKOMĚŘŮ

Průtokoměry lze klasifikovat podle mnoha hledisek, např. podle použité měřicí metody (dále např. podle druhu měřené tekutiny, podle charakteru výměny energie mezi průtokoměrem a tekutinou apod.). Metody měření průtoku se dělí do tří základních skupin, a to na metody objemové, rychlostní a hmotnostní.

- 1) *Objemové metody* - založeny na odměřování objemu tekutiny v odměrných prostorách, měřítkem proteklého množství je počet měřicích cyklů.
- 2) *Rychlostní metody* - vhodnou technikou se měří rychlost proudící tekutiny. Na základě střední nebo místní rychlosti (popř. na základě znalosti rychlostního profilu) a průtočného průřezu se počítá objemový průtok Q_V .
- 3) *Hmotnostní metody* - měří se veličina, která je přímo úměrná hmotnostnímu průtoku Q_m .

Průtokoměry pracující objemovou metodou se nazývají objemové průtokoměry. Používají se především při přesných měřeních (např. při kalibraci jiných měřidel průtoku) a v provozech při bilančních měřeních kapalin i plynů. Lze je rozdělit na měřidla s nespojitou funkcí (průtok určen přírůstkem objemu za určitý časový úsek - např. zvonový krychloměr), a na měřidla se spojitou funkcí, mezi která patří např. membránový či bubnový plynoměr, oválové průtokoměry a různé typy pístových měřidel.

Měřidla průtoku využívající rychlostní metodu se stručně označují jako rychlostní průtokoměry. Patří mezi ně turbínové a lopatkové průtokoměry, indukční, ultrazvukové, dále rychlostní sondy a průtokoměry vybavené škrticími orgány (tzv. průřezové průtokoměry). Zvláštní skupinu tvoří rotometry a jejich modifikace (proměnný průtočný průřez) a též průtokoměry deformační (náporové), které využívají mechanických účinků kinetické energie proudící tekutiny.

V současné době mají jako průtokoměry měřící hmotnostní metodou dominantní postavení dva typy měřidel: Coriolisovy a teplotní průtokoměry (kalorimetrické průtokoměry a hmotnostní termoanemometry). Hmotnostní průtok lze určit i nepřímou cestou, tj. pomocí konvečních průtokoměrů s dalšími senzory. Hmotnostní průtok je dodatečně počítán z naměřeného objemového průtoku a naměřené hustoty. Jako příklad lze uvést turbínový průtokoměr ve spolupráci s vibračním snímačem hustoty.

Obecně však platí, že přímé měření hmotnostního průtoku je přesnější metodou, neboť naměřený údaj nezávisí na hustotě, teplotě, viskozitě ani na tlaku tekutiny. [6][7]

Možnosti použití, pracovní podmínky a základní vlastnosti jednotlivých typů průtokoměrů jsou přehledně uvedeny v Tab. 1.1 a Tab. 1.2. Vybraným typům průtokoměrů jsou pak věnovány podkapitoly 1.3 až 1.12.

Kapaliny	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
čisté (voda)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	---	X
pomalou proudící (<2l/min)	X	X	X	X	---	X	?	X	X	?	---	---
rychle proudící (>20l/min)	X	---	?	X	?	X	X	---	---	---	---	X
nevodivé	X	X	X	X	X	---	X	X	X	X	---	---
velké potrubí (DN > 500)	X	---	---	?	---	X	X	---	---	X	---	X
horké (> 200°C)	X	?	---	X	X	---	?	X	?	X	---	---
viskózní (> 50cP)	?	---	X	---	---	X	?	X	---	?	---	---
kryogenické	---	---	X	X	---	X	X	X	---	X	---	---
potraviny (mléko, pivo)	---	---	X	X	---	X	X	X	---	---	---	---
Plyny	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
běžné (např. vzduch)	X	X	?	X	X	---	?	X	X	?	---	---
pomalou proudící (<20l/min)	?	X	X	?	---	---	---	X	X	X	---	---
rychle proudící (klimatizace)	X	---	---	---	?	---	---	---	X	?	---	---
horké (> 200°C)	X	---	---	---	X	---	?	?	?	X	---	---
pára	X	---	---	---	X	---	?	?	---	X	---	---
Různé směsi	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
kaše (např. barvy)	?	---	---	---	---	X	?	?	---	---	---	---
směs kapalin (voda/olej)	X	---	?	?	X	?	?	X	---	?	---	---
směs plyn/kapalina	---	---	---	---	---	?	---	?	---	---	---	---
korozivní kapaliny	?	?	?	?	?	?	X	X	---	---	---	---
korozivní plyny	?	?	---	?	?	---	---	---	---	---	---	---
kaly v hornictví	?	---	---	---	---	X	---	---	---	?	X	---
prášky/zrna	---	---	---	---	---	---	---	---	---	?	X	---
Otevřené kanály	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
obecné (řeky, kanály)	---	---	---	---	---	X	---	---	---	X	---	X
odpadové kanály	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	X
zavlažování	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	X
P1 - tlakový rozdíl (škrtkové orgány, clony)					P7 - ultrazvukové							
P2 - tlakový rozdíl jiné (Pitotovy trubice, rotometry)					P8 - Coriolisovy							
P3 - terčiky					P9 - Tepelné							
P4 - turbíny					P10 - jiné (vážení, rad. záření)							
P5 - vírové, fluidické					P11 - průtokoměry pevných částic							
P6 - indukční (elektromagnetické)					P12 - otevřené kanály							
Vysvětlivky: X - vhodné, ? - vhodné pouze za jistých podmínek, --- nevhodné												

Tab. 1.1 Osvědčené aplikace jednotlivých typů průtokoměrů [2]

Typ průtokoměru	kapaliny, plyny	Přesnost	$\frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	Tlakové ztráty	Nároky na instalaci	Pořizovací náklady	DN [mm]	Teplotní rozsah [°C]	Průtoky [m ³ /h], (kg/h)
Venturiho trubice	K	**	5:1	M	M	M/H	50 ÷ 1200	---	30 ÷ 7000
	P	**	5:1	---	---	---	50 ÷ 1200	---	400 ÷ 10 ⁵
Proměnný průřez	K	---	10:1	M	L/M	L	15 ÷ 150	-200 ÷ 350	10 ⁻⁴ ÷ 100
	P	---	10:1	---	---	---	15 ÷ 150	---	10 ⁻² ÷ 2000
Turbínové	K	***	10:1	M	H	L/M	5 ÷ 600	-265 ÷ 310	0,03 ÷ 7000
	P	***	30:1	---	---	---	25 ÷ 600	-10 ÷ 50	0,01 ÷ 25000
Indukční	K	**	100:1	L	M	M	2 ÷ 3000	-50 ÷ 190	10 ⁻² ÷ 10 ⁵
Ultrazvukové (transit time)	K	**	20:1	L	H/M	M/H	10 ÷ 2000	-200 ÷ 260	3 ÷ 10 ⁵
	P	**	30:1	---	H/M	M/H	20 ÷ 1000	-50 ÷ 260	0,04 ÷ 10 ⁵
Teplotní	K	*	15:1	M	L	M	2 ÷ 6	0 ÷ 65	(0,002 ÷ 100)
	P	*	50:1	L/M	M/H	M	6 ÷ 200	-50 ÷ 300	(2 · 10 ⁻⁴ ÷ 8000)
Coriolisovy	K	**	100:1	M/L	L	H	6 ÷ 200	-240 ÷ 200	(1 ÷ 7 · 10 ⁵)

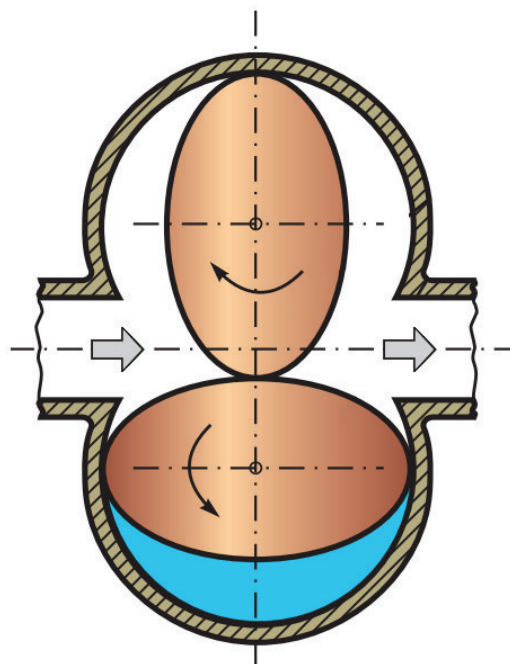
*** - velmi vysoká, ** - vysoká, * - střední, L = nízké (low), M = střední (medium), H = vysoké (high)

Tab. 1.2 Přehled vlastností vybraných typů průtokoměrů [1]

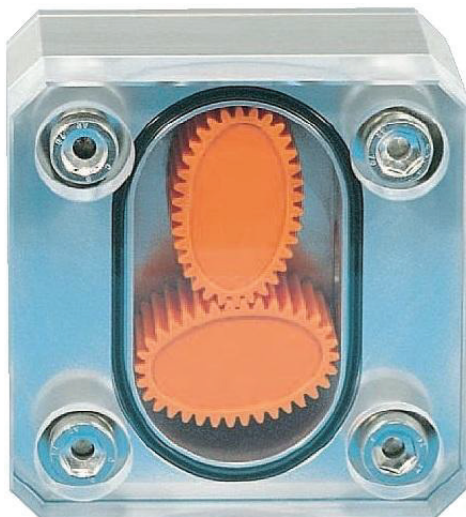
1.3 OVÁLOVÝ PRŮTOKOMĚR

Oválový průtokoměr se skládá ze dvou zpravidla ozubených oválných těles zapadajících do sebe a komory, ve které se obě tělesa otáčejí. Rozdíl tlaků na vtokové a výtokové straně průtokoměru uvádí oválná tělesa do pohybu, čímž dochází k odměřování kapaliny, neboť otáčením vznikají mezi tělesy a stěnami komory střídavě se plnící a vyprazdňující odměrné prostory. Popsaný princip je zřejmý z Obr. 1.6. Počet otáček jednoho z těles se zaznamenává v čítači jako veličina úměrná objemovému průtoku. [2]

Oválová měřidla se používají k měření průtoku i průtočného množství různých organických kapalin a produktů petrochemického a potravinářského průmyslu. Rozsah průtoků se pohybuje v rozmezí od jednotek $l \cdot h^{-1}$ do stovek $m^3 \cdot h^{-1}$ při tlacích až 2MPa a teplotě až 300°C . Na stejném principu pracují i průtokoměry s rotačními tělesy ve tvaru piškotů i plynoměry s rotačními písky. [6]



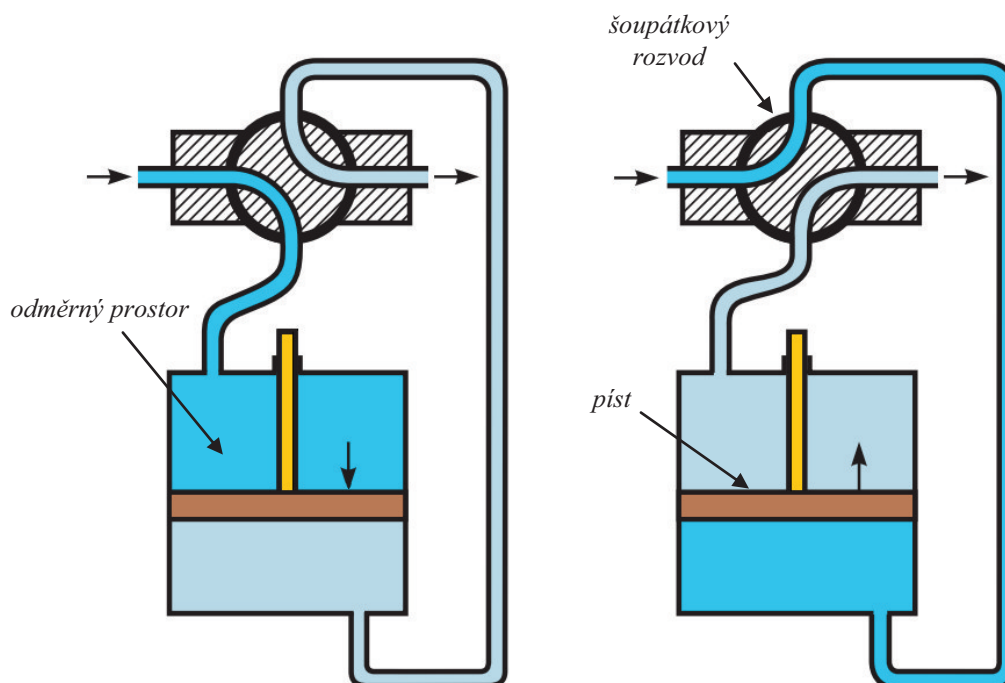
Obr. 1.6 Princip oválového objemového průtokoměru [6]



Obr. 1.7 Oválný průtokoměr firmy Direct Industry [21]

1.4 PÍSTOVÁ MĚŘIDLA PRŮTOKU

U pístových měřidel průtoku dochází ke střídavému naplňování a vyprazdňování odměrného prostoru, který je vymezen pístem a tělesem měřidla. Píst se opět uvádí do pohybu pomocí tlakového spádu. Aby byla zajištěna plynulá funkce průtokoměrů, používá se dvou i více odměrných prostorů. Na Obr. 1.8 je uveden pístový průtokoměr s dvojčinným válcem a pístem vykonávajícím přímočarý vratný pohyb. Pístní tyč ovládá šoupátkový rozvod a počítadlo. [6]



Obr. 1.8 Princip činnosti pístového objemového průtokoměru [6]

Měřicí rozsah pístových měřidel se pohybuje přibližně v rozmezí od $0,5$ do $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

1.5 RYCHLOSTNÍ SONDY

Rychlostní sondy využívají závislosti dynamického tlaku proudící tekutiny na rychlosti proudění, patří mezi ně Pitotova a Prandltova trubice. U ústí Pitotovy trubice, které je situováno kolmo ke směru proudění, rychlost tekutiny klesá na nulu a veškerá kinetická energie přechází v energii potenciální. Sonda snímá celkový tlak p_c , který je dán součtem dynamického tlaku p_d a tlaku statického p_s , který je měřen v jiném místě trubice. Při známé hustotě tekutiny ρ lze na základě Bernoulliho rovnice (1.8) psát vztah

$$p_c = p_d + p_s = \frac{\rho v^2}{2} + p_s \rightarrow v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}} \quad (1.19)$$

Objemový průtok Q_V se určí vynásobením rychlosti plochou průřezu potrubí. Aby bylo měření Pitotovou trubicí přesné, je nutné ústí trubice nastavit do místa, kde tekutina proudí střední rychlostí. To je prakticky možné jen u turbulentního proudění, které má plochý rychlostní profil viz podkapitola 1.1.8. [2][6]

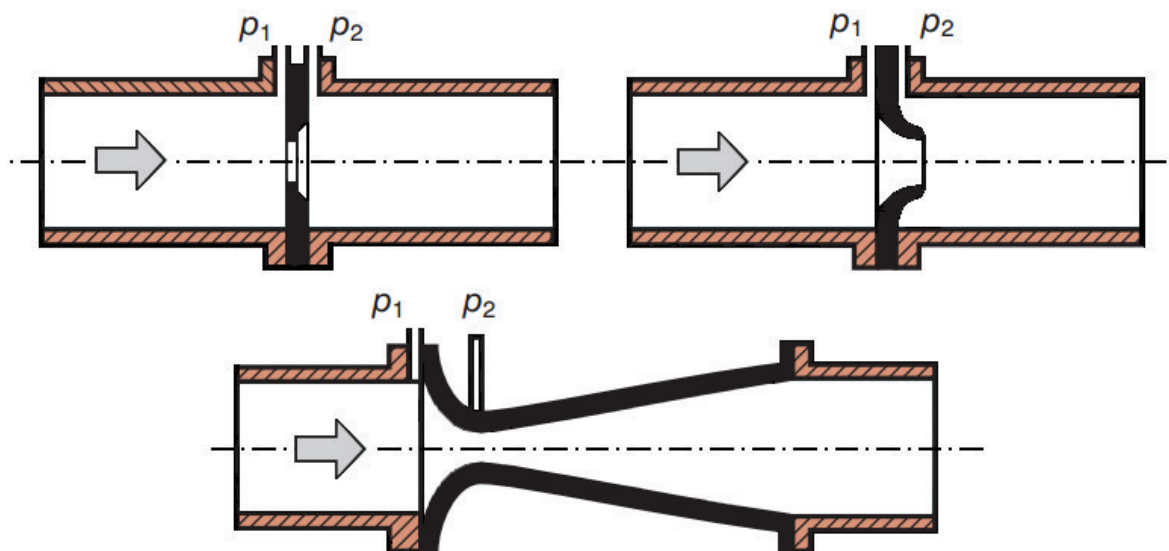


Obr. 1.9 Pitotovy trubice firmy Prisma Instruments [16]

Prandltova trubice je konstrukčně upravena tak, že měří celkový i statický tlak v jednom místě. V praxi se též využívají rychlostní sondy s více otvory, které umožňují určit průměrnou rychlost na základě snímaných údajů o celkovém a statickém tlaku na náporové straně a na straně obrácené do úplavu. Rychlostní sondy se vyznačují malou tlakovou ztrátou, přesností 2 až 5% a rozsahem průtoků $1 \div 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. [6]

1.6 PRŮŘEZOVÉ PRŮTOKOMĚRY

Objemový průtok Q_V se u těchto zařízení určuje na základě difference statických tlaků, které jsou měřeny před a za zúžením průtočného průřezu. Zmenšení průtočného průřezu se docíljuje pomocí škrtících orgánů, mezi nejpoužívanější patří kruhová clona, dýza a tzv. Venturiho trubice, viz Obr. 1.10.



Obr. 1.10 Nejpoužívanější typy škrtících orgánů - kruhová clona a dýza (nahore), Venturiho trubice (dole) [6]

Při odvození vzorce pro objemový průtok se vychází z rovnice kontinuity toku (zákon zachování hmoty) a z Bernoulliho rovnice, která vyjadřuje zákon zachování energie (podrobněji viz podkapitoly 1.1.3 a 1.1.4). Za předpokladu nestlačitelné tekutiny platí

$$Q_V = S_1 v_1 = S_2 v_2 \rightarrow v_1 = \left(\frac{S_1}{S_2}\right) \cdot v_2 \quad (1.20)$$

Pro horizontální potrubí je rozdíl hydrostatických tlaků nulový a Bernoulliho rovnice (1.8) se zjednoduší na tvar

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \rightarrow p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (1.21)$$

Statický tlak se měří v jisté vzdálenosti před clonou (v_1 , p_1 , průřez S_1) a za clonou v místě minimálního statického tlaku, kde je maximální rychlost a koncentrace proudnic (v_2 , p_2 , průřez S_2). Po dosazení rovnice (1.20) do rovnice (1.21) a následném vyjádření rychlosti v_2 získáváme vztah platný pro výpočet Q_V , který je uveden na následující straně. [2][6]

Výpočtový vztah pro objemový průtok průřezového průtokoměru

$$Q_V = S_2 \cdot v_2 = \frac{S_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (1.22)$$

Do vztahu (1.22) se dále zavádí tzv. součinitel průtoku C_P , který je závislý na Reynoldsovu číslu a na zúžení průtočného průřezu, tj. na poměru průměrů β kruhových ploch S_1 a S_2 ($\beta = d/D$). Hodnoty C_P se určují pro různé typy škrťacích orgánů experimentálně. Protéká-li clonou plyn nebo pára, dochází k expanzi a ke změně hustoty tekutiny, tato skutečnost je zohledněna expanzním součinitelem ε . Výsledný vzorec pro výpočet objemového průtoku má tedy tvar

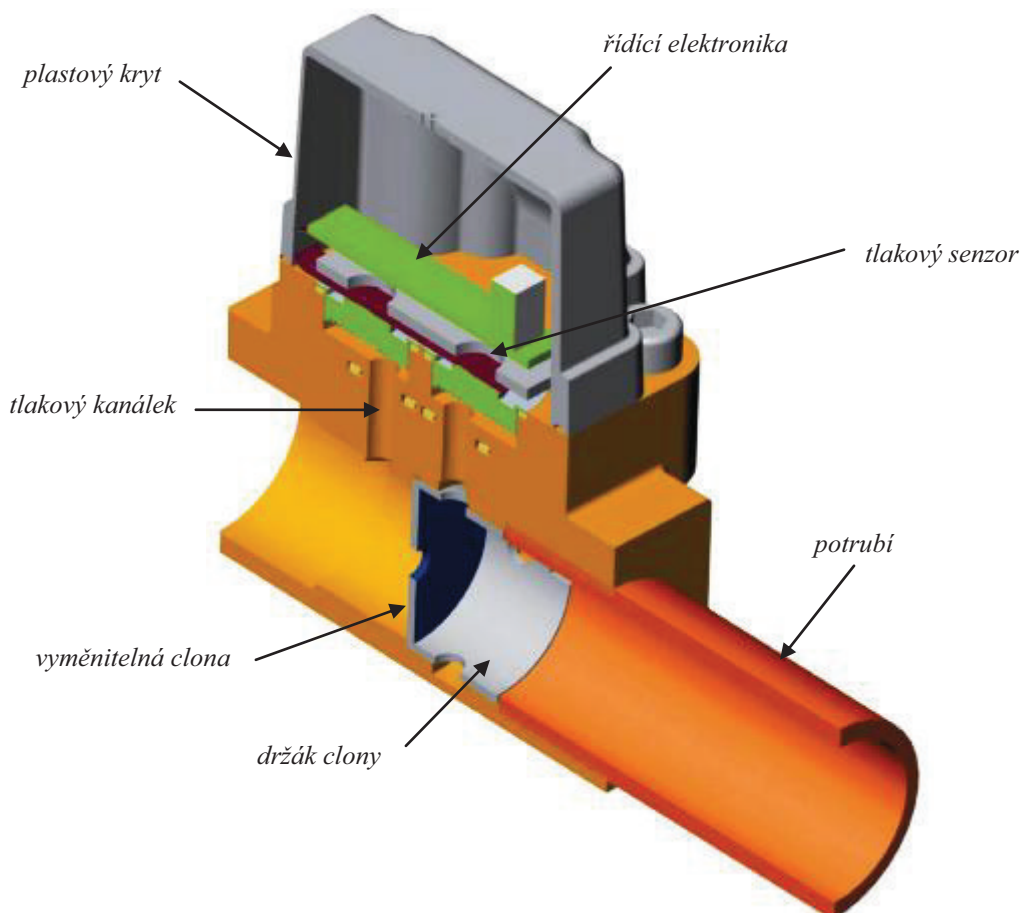
$$Q_V = \frac{C_P(R_e, \beta) \cdot \varepsilon \cdot S_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (1.23)$$

Diference statických tlaků vznikající na škrťacím orgánu se měří rozdílovým tlakoměrem, který je napojen na komorové odběry, nebo na bodové odběry v podobě kanálků. Při komorovém odběru se snímá tlak po celém obvodu měřicí clony. [6]



Obr. 1.11 Průřezový průtokoměr firmy Elleta [17]

Přesnost průřezových průtokoměrů se pohybuje od 0,5 do 2%, z hlediska tlakových ztrát je nejvýhodnější Venturiho trubice, neboť při použití tohoto škrťacího orgánu nedochází ke vzniku vírů v tekutině. Největší tlakové ztráty vykazují clony. Jako příklad praktické konstrukce je uveden na Obr. 1.11 a Obr. 1.12 průtokoměr firmy Elleta.



Obr. 1.12 Průřezový průtokoměr firmy Elleta - pohled v řezu [17]

Mezi průtokoměry založených na principu tlakové diference patří též kapilární (laminární) měřiče průtoku. Jako škrtící orgán se využívá kapilára a tlakový spád se opět snímá pomocí rozdílových tlakoměrů, zpravidla kapalinovými manometry nebo elektronickými snímači s odporovými tenzometry. Pro laminární tok kapilárou platí tzv. Hagenova-Poiseuillova rovnice

$$Q_V = \frac{\pi d^4}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot (p_1 - p_2) \quad (1.24)$$

kde $d, l [m]$ je průměr resp. délka kapiláry a $\eta [Pa \cdot s]$ dynamická viskozita tekutiny. Vhodný průměr kapiláry se určí z podmínky pro laminární proudění a ze vztahu (1.10)

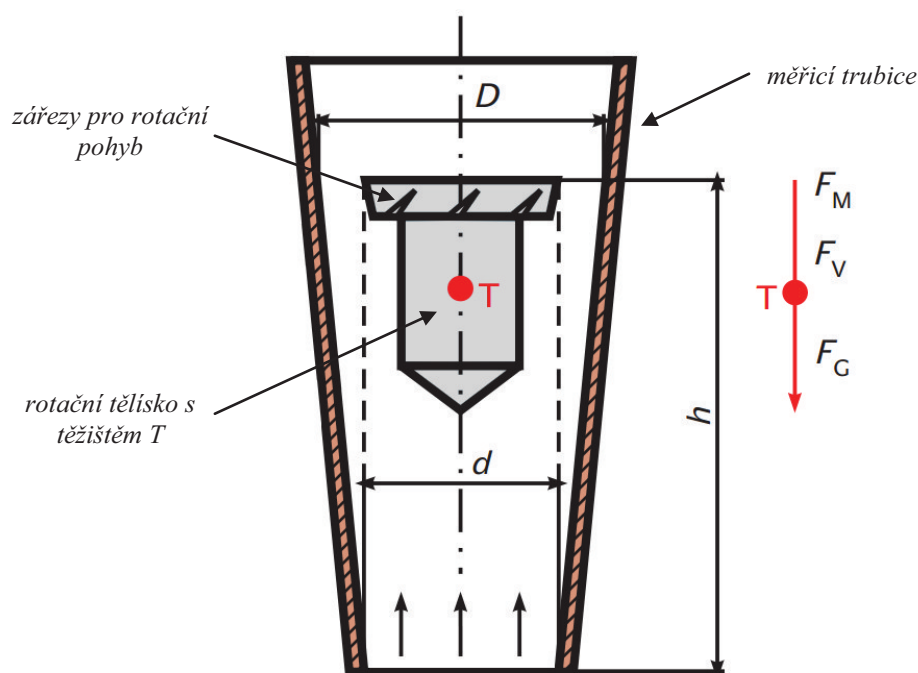
$$R_{eD} = \frac{4\rho \cdot Q_V}{\eta \cdot \pi \cdot d} \leq 2300 \rightarrow d \quad (1.25)$$

Kapilární průtokoměry se využívají při laboratorních měřeních malých průtoků, lze jimi měřit pouze čisté tekutiny se známou hodnotou dynamické viskozity. [6]

1.7 ROTAMETRY - PRŮTOKOMĚRY S PROMĚNNÝM PRŮŘEZEM

U rotametrů dochází vlivem měnícího se průtoku ke změně průtočné plochy S_p při přibližně stálém tlakovém spádu na zúženém průřezu. Hlavní funkční části průtokoměru tvoří svisle umístěná měřicí trubice konického tvaru a rotační tělísko, které se obvykle označuje jako plováček (proto se lze setkat s označením plováčkový průtokoměr, nicméně jedná se o nepřesné označení, nevystihující fyzikální podstatu měřidla). Principiální uspořádání rotametry ilustruje Obr. 1.13.

Měřená tekutina proudí trubicí, čímž nadnáší rotační tělísko, které podle velikosti průtoku zaujímá v trubici vyšší či nižší polohu. Tím se mění průřez, kterým tekutina protéká, přičemž měřítkem průtoku je vertikální poloha tělíska h . Polohu tělíska lze snímat např. magnetickými nebo fotoelektrickými snímači. Horní okraj tělíska bývá opatřen zářezy, takže účinkem proudění je tělísko uváděno do rotačního pohybu, který stabilizuje polohu tělíska v trubici. [6]



Obr. 1.13 Principiální uspořádání rotametry - průtokoměru s proměnným průřezem [6]

V ustáleném stavu zaujímá tělísko stálou polohu a veškeré síly působící v jeho těžišti T jsou v rovnováze. Směrem dolů působí tíhová síla F_G , opačným směrem pak síla vztlaková F_V a síla proudícího média F_M skládající se z třecí síly F_t a síla tlakové F_p . Za předpokladu turbulentního obtékání tělíska lze zanedbat třecí sílu F_t a po dosažení za F_G , F_p a F_V platí pro tlakový spád Δp rovnice (1.26) uvedená na následující straně. [6]

Rovnice tlakového spádu Δp průtokoměru s proměnným průřezem

$$\Delta p = \frac{V_T g (\rho_T - \rho)}{S_{pT}} \quad (1.26)$$

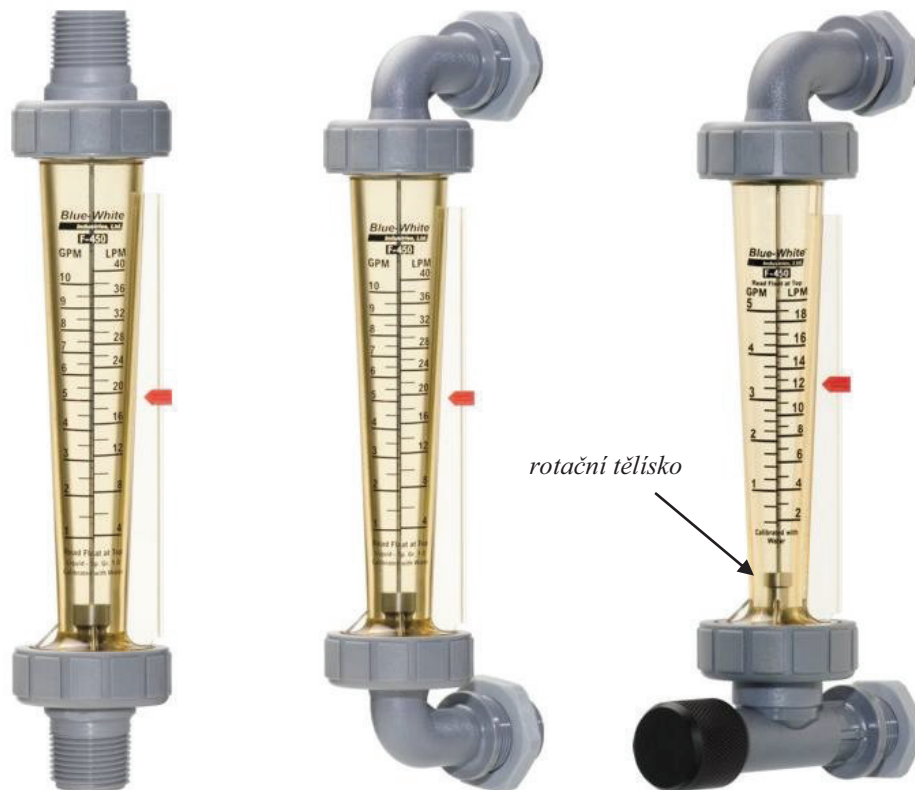
kde $V_T [m^3]$ je objem tělíska, $\rho_T [kg \cdot m^{-3}]$ hustota tělíska, $g [m \cdot s^{-2}]$ tíhové zrychlení a $S_{pT} [m^2]$ plocha největšího průřezu tělíska. Průtočným průřezem je mezikruží, jehož plocha je funkcí polohy tělíska h .

$$S_p(h) = S_{trub}(h) - S_{pT} = \frac{\pi}{4} (D^2(h) - d^2) \quad (1.27)$$

Dosažením rovnice (1.26) do analogické rovnice (1.22), která bylo odvozena pro průřezový průtokoměr, lze pro objemový průtok Q_V měřený rotametrem psát vztah

$$Q_V = C_R \cdot (S - S_{pT}) \cdot \sqrt{\frac{2gV_T}{S_{pT} \cdot \rho} \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right)} \quad (1.28)$$

kde $C_R [-]$ představuje průtokový součinitel, jehož velikost závisí na tvaru tělíska, viskozitě tekutiny a na hodnotě Reynoldsova čísla. [6]



Obr. 1.14 Rotametry firmy Blue-White Industries, Ltd. [18]

1.8 ULTRAZVUKOVÉ PRŮTOKOMĚRY

Princip činnosti těchto zařízení je založen na změně rychlosti šíření nebo změně frekvence ultrazvukového vlnění při jeho průchodu tekutinou. Ultrazvukové vlnění se šíří mezi senzory, které jsou umístěny na stěnách potrubí a které plní funkci vysílače i přijímače ultrazvukového signálu.

Mezi základní ultrazvukové průtokoměry patří:

- 1) *Transit time* (přímé impulzní): v současné době nejpoužívanější technologie, průtokoměr měří časový rozdíl průchodu ultrazvukového signálu přes fixní vzdálenost L nejdříve proti směru toku a následně po směru. Tento typ ultrazvukového průtokoměru je podrobněji popsán v následující podkapitole 1.8.1.
- 2) *Dopplerovy*: levnější avšak méně přesné. Vyhodnocují změnu kmitočtu vysílaného vlnění po jeho odrazu od pevných částic (popř. bublinek) unášených proudící tekutinou. Rozdíl mezi frekvencemi vysílaného a odraženého signálu je úměrný rychlosti proudícího média. Dopplerovy průtokoměry vyžadují koncentraci pevných částic nebo bublin nejméně 25 ppm o velikosti minimálně 30 μm . [1][2]

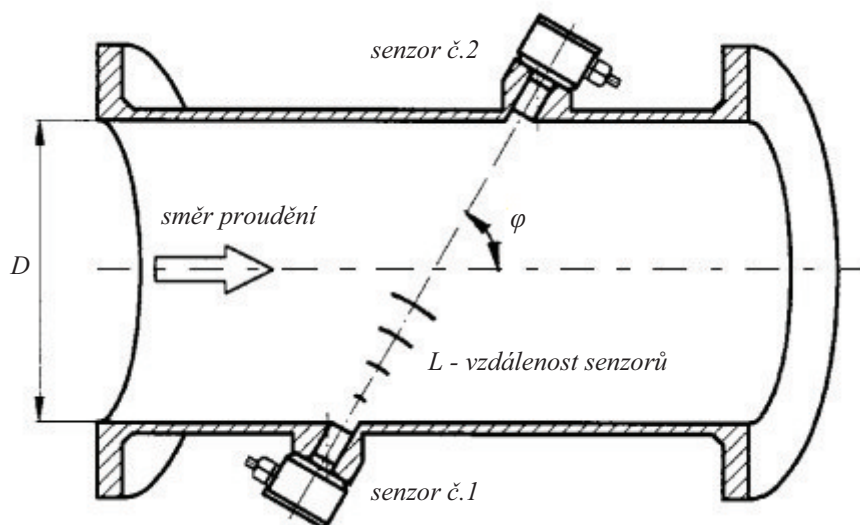
1.8.1 Ultrazvukový průtokoměr - typ Transit Time (přímý impulzní)

Jak již bylo zmíněno, tento typ průtokoměru měří rozdíl (diferenci) doby průchodu Δt dvou impulzů ultrazvukového signálu vysílaných střídavě po směru a proti směru toku tekutiny. Základní uspořádání tohoto průtokoměru ilustruje Obr. 1.15.

Ultrazvukový signál se v případě vysílání po směru toku šíří rychlostí $c + \bar{V}_a \cdot \cos\varphi$ a zmenšenou rychlostí $c - \bar{V}_a \cos\varphi$ při postupu opačným směrem. Doba šíření (*transit time*) je v případě absence příčných složek toku dána rovnicemi

$$t_{12} = \frac{L}{c + \bar{V}_a \cdot \cos\varphi} \quad t_{21} = \frac{L}{c - \bar{V}_a \cos\varphi} \quad (1.29)$$

kde t_{12} [s] představuje dobu šíření signálu po směru toku (tj. od senzoru č.1 k senzoru č.2), L [m] vzdálenost mezi senzory (zvuková dráha), c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] rychlost šíření signálu při daných provozních podmínkách, \bar{V}_a [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] průměrnou axiální rychlost podél vzdálenosti L a φ [°] úhel mezi osou senzorů a vektorem \bar{V}_a . Je zřejmé, že platí nerovnost $t_{12} < t_{21}$.



Obr. 1.15 Princip "transit-time" průtokoměru. Tekutina se pohybuje rychlostí \bar{V}_a a pod úhlem φ vzhledem k ultrazvukovému impulzu [4]

Diference doby průchodu Δt je pak dána rozdílem dob šíření signálu

$$\Delta t = t_{21} - t_{12} = 2L \frac{\bar{V}_a \cdot \cos\varphi}{c^2 - (\bar{V}_a \cdot \cos\varphi)^2} \approx 2L \frac{\bar{V}_a \cdot \cos\varphi}{c^2} \quad (1.30)$$

V rovnici (1.30) je patrná nelineární závislost časového rozdílu na \bar{V}_a , kterou lze v praxi zanedbat, jelikož je obvykle $v^2 \ll c^2$. Výhodou popsané diferenční metody měření je ta skutečnost, že rychlosti proudění úměrný časový rozdíl Δt vylučuje účinky rušivých vlivů působících současně na oba signálové paprsky. Pro axiální střední rychlost \bar{V}_a tedy přibližně platí

$$\bar{V}_a = \frac{c^2}{2L \cdot \cos\varphi} \cdot \Delta t \quad (1.31)$$

Závislost \bar{V}_a na kolísání rychlosti šíření ultrazvukového signálu lze vyloučit výpočtem součinu $t_{12} \cdot t_{21}$ a následným dosazením do rovnice (1.30) pro určení rozdílu časových intervalů. Po úpravě platí pro \bar{V}_a vztah

$$\bar{V}_a = \frac{L}{2\cos\varphi} \left(\frac{1}{t_{21}} - \frac{1}{t_{12}} \right) = \frac{D}{\sin(2\varphi)} \cdot \frac{\Delta t}{t_{12} \cdot t_{21}} \quad (1.32)$$

Výslednou střední rychlost proudění \bar{V} je možné určit pomocí hydraulického korekčního činitele, jehož hodnota závisí na druhu proudění, tj. na hodnotě Reynoldsova čísla R_{eD} . Korigované rychlosti je pak použito pro výpočet objemového průtoku Q_V . [2][4]

$$Q_V = \bar{V} \cdot S_D = \frac{\bar{V}_a}{k_h(R_{eD})} \cdot S_D \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (1.33)$$

Pro kruhový průřez potrubí byla odvozena logaritmická závislost k_h na R_{eD}

$$k_h = 0,79 + 0,02 \cdot \log(R_{eD}) \quad (1.34)$$

Kromě přímých impulzních průtokoměrů využívají diferenční metodu též průtokoměry s vícenásobným odrazem signálu na reflektorech. Výhodou této koncepce je větší citlivost a možnost umístění ultrazvukových senzorů pouze na jedné straně potrubí. [2][4]



Obr. 1.16 Dvoukanálový ultrazvukový průtokoměr firmy Procon Systems Inc. [22]

Pro zmenšení nejistoty měření se používá vícekanálových provedení (Obr. 1.16). Ultrazvukové průtokoměry umožňují měřit průtoky kapalin, plynů, saturovaných a přehřátých par a též průtoky kalů a tekutých kovů. Lze je použít jak pro velmi čisté tekutiny, tak i silně agresivní a obsahující pevné částice. Jsou schopny pracovat v libovolné poloze a měřit proudění v obou směrech, navíc je možné provést jejich dodatečnou montáž na potrubí. Společnou vlastností ultrazvukových a indukčních průtokoměrů je schopnost měřit průtok bez poklesu tlaku proudícího média. U ultrazvukových průtokoměrů je tlaková ztráta maximálně několik Pa . [2]

Oproti indukčním průtokoměrům mají ultrazvukové dvě značná pozitiva: lze je aplikovat prakticky na jakýkoliv druh proudící tekutiny a jejich pořizovací náklady jsou

téměř nezávislé na průměru potrubí (indukční průtokoměry vyžadují pro svoji činnost určitou el. vodivost média a jejich cena dramaticky roste s velikostí průměru potrubí). Další výhodou je jejich necitlivost na vnější magnetická pole. [4]



Obr. 1.17 Příložný ultrazvukový průtokoměr Optisonic 6300 firmy Krohne [23]



Obr. 1.18 Pětikanálový ultrazvukový průtokoměr Altosonic V firmy Krohne [23]

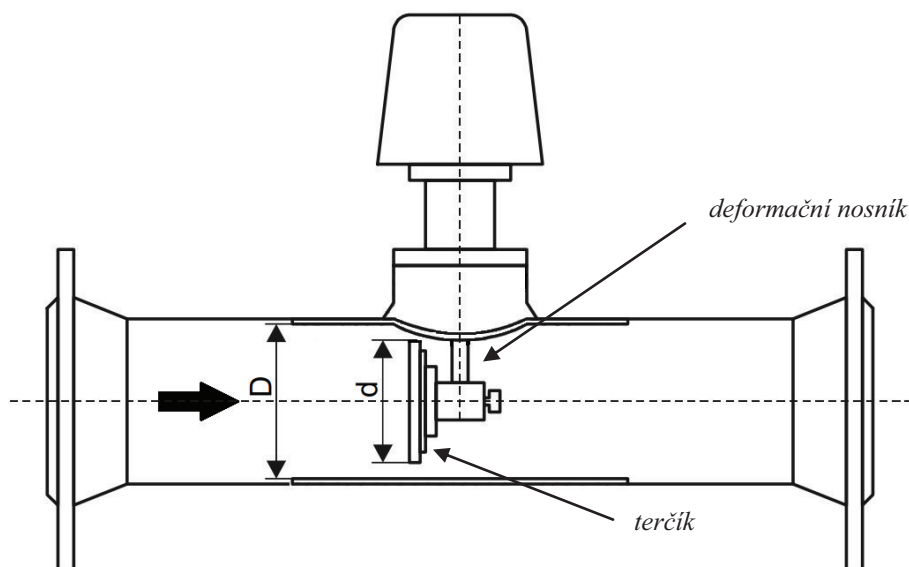
1.9 DEFORMAČNÍ (NÁPOROVÉ) PRŮTOKOMĚRY

Deformační průtokoměry využívají účinku kinetické energie proudící tekutiny na tzv. reakční desku, která má nejčastěji tvar kruhového terčíku (též klapky či pádélka). Terčík je napojen na vhodný deformační člen, buď na nosník, nebo na torzní prvek. Je-li terčík symetrický, lze měřit objemový průtok v obou směrech. Deformační síla působící na terčík je úměrná velikosti dynamického tlaku tekutiny, pro její velikost platí vztah

$$F_D = k_t \cdot S_t \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (1.35)$$

kde k_t [–] je součinitel závislý na tvaru terčíku, S_t [m^2] plocha terčíku, v [$m \cdot s^{-1}$] průměrná rychlost mezi terčíkem a potrubím.

Rovnice (1.35) platí za předpokladu turbulentního proudění v celém rozsahu měřených průtoků. Kromě deformační síly F_D působí na terčík třecí síla, jejíž velikost je závislá na viskozitě tekutiny a na geometrii terčíku. Důsledkem působení síly F_D je deformace deformačního členu, která se vyhodnocuje např. odporovými tenzometry. [2]



Obr. 1.19 Zásuvný deformační průtokoměr s kruhovým terčíkem [12]

Výsledný objemový průtok v potrubí o průměru D je při hustotě tekutiny ρ dán rovnicí

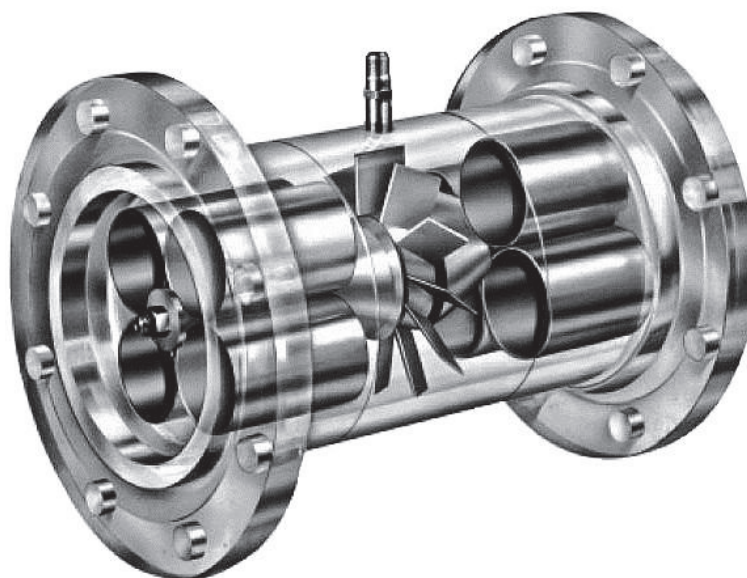
$$Q_V = S_P \cdot v = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \sqrt{\frac{2F_D}{k_t \cdot S_t \cdot \rho}} = \frac{D^2 - d^2}{d} \cdot \sqrt{\frac{F_D}{K \cdot \rho}} \quad (1.36)$$

Jednoduché terčíkové průtokoměry se využívají pro nenáročné aplikace jako např. detektory průtoku či průtokové spínače. Precizní deformační průtokoměry jsou vhodné pro měření průtoku znečištěných nebo korozivních tekutin, příp. viskózních kapalin a kapalin obsahující pevné částice. Vyžadují individuální kalibraci pro každou tekutinu, pro přesná měření je nutné použít přímých úseků potrubí o délce $10D$ proti směru proudění a $5D$ po směru. Nejistoty při měření deformačními průtokoměry dosahují pro větší průtoky hodnot kolem 5%. Tlaková ztráta se pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,5 baru a rozsah průtoků mezi $1 \div 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. [2][6]

1.10 TURBÍNOVÉ A LOPATKOVÉ PRŮTOKOMĚRY

Princip těchto průtokoměrů je velmi jednoduchý, protékající tekutina uvádí do pohybu rotor s vhodně tvarovanými lopatkami (turbínu, lopatkové popř. šroubové kolo). Rychlost otáčení je úměrná střední rychlosti proudění. Rotor bývá zpravidla situován v ose tělesa průtokoměru a snímání jeho otáček je prováděno bezkontaktními senzory (indukčními, kapacitními či optickými), které jsou vzhledem k rotoru umístěny v kolmé poloze. Též se využívá kontaktní snímání převodem z osy rotoru.

Turbínové průtokoměry vykazují široký rozsah lineární závislosti otáček rotoru na rychlosti proudění tekutiny a při standardních konstrukčních provedení pracují spolehlivě v rozmezí $Re_D \in (4 \div 20) \cdot 10^3$. Jedná se o průtokoměry axiální, neboť osa turbíny je rovnoběžná se směrem proudění tekutiny.

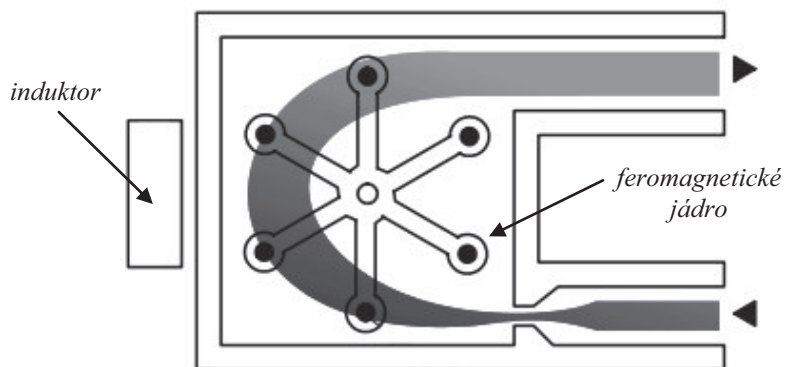


Obr. 1.20 Turbínový průtokoměr určený pro přesné měření průtoku plynů [15]

Postupem času dochází k opotřebení ložisek turbíny, a proto je nutné v pravidelných intervalech provádět jejich výměnu. V případě měření kapalin s velkým obsahem nečistot či erozivních částic, je nutné předradit k turbínovému průtokoměru filtr. [2]

Lopatkové průtokoměry se liší oproti turbínovým průtokoměrům tím, že osa rotoru (lopatkového kola) je orientována kolmo na směr proudění. Jedná se tedy o radiální průtokoměry. Lopatkové průtokoměry se často používají jako vodoměry pro měření proteklého množství pitné i užitkové vody (Obr. 1.22). Otáčky se snímají stejným způsobem jako u turbínových průtokoměrů.

Společným nedostatkem turbínových i lopatkových průtokoměrů je značně velká relativní chyba v počátku stupnice, běžně využívaný rozsah bývá od 10% do 100% maximálního průtoku. V oblasti pod 10% rozsahu se velmi projevuje tření v ložiskách a tření v tekutině a závislost frekvence otáček na Q_V není již lineární. [6]



Obr. 1.21 Příklad jednoduchého radiálního lopatkového průtokoměru [12]

Další nevýhodou je skutečnost, že průtok nelze měřit úplně od nuly, ale až při překonání statických odporů, tj. při dosažení určitého minimálního průtoku Q_{min} . Do té doby není měřidlo schopno zaznamenat žádné proteklé množství tekutiny. Rotor průtokoměru představuje v proudu tekutiny značnou překážku, vzniká na něm poměrně velká trvalá tlaková ztráta, řádově až jednotek kPa na horní mezi průtoku. Směrem k menším průtokům tlaková ztráta rychle klesá, protože její závislost na velikosti průtoku je přibližně kvadratická. [2]



Obr. 1.22 Vícevtokový lopatkový vodoměr firmy Omega [19]

Mezi výhody těchto průtokoměrů patří malá nejistota měření, jednoduchost, spolehlivost a použitelnost pro velký rozsah průměrů potrubí a velké tlaky média (až desítky MPa). Měření průtoku závisí pouze na mechanických parametrech tekutiny, není ovlivněno jejími elektrickými vlastnosti ani proměnlivým složením.

1.11 CORIOLISOVY HMOTNOSTNÍ PRŮTOKOMĚRY

Tato skupina průtokoměrů využívá působení Coriolisovy síly. Proudí-li tekutina rychlostí \mathbf{v} v potrubí rotujícího úhlovou rychlostí $\boldsymbol{\omega}$, pak na každý element tekutiny o hmotnosti Δm působí Coriolisova síla ve směru kolmém na rovinu vektorů \mathbf{v} a $\boldsymbol{\omega}$, která je dána vztahem

$$\Delta \mathbf{F}_C = 2\Delta m \cdot \mathbf{a}_C = 2\Delta m \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) \quad (1.37)$$

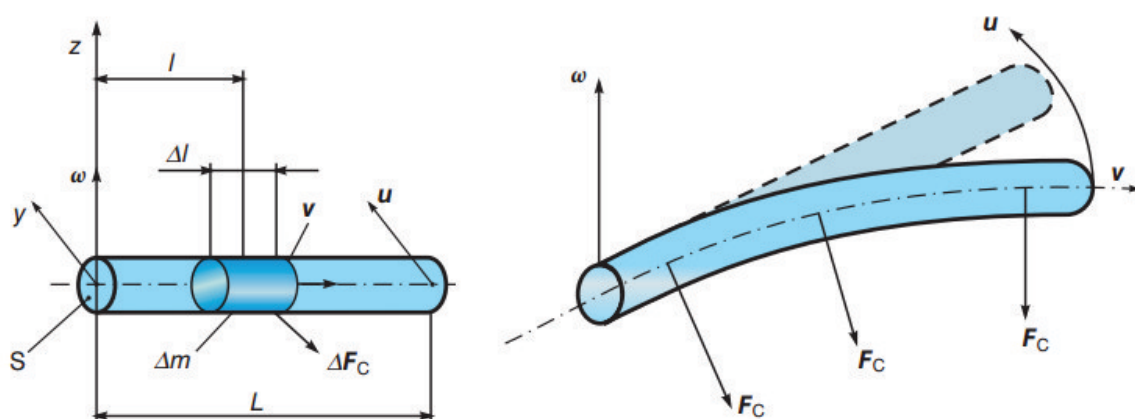
kde vektor \mathbf{a}_C představuje Coriolisovo zrychlení. Tento jev a jeho důsledky znázorňuje Obr. 1.23. Vektory \mathbf{v} a $\boldsymbol{\omega}$ jsou navzájem kolmé, takže po vyjádření rychlosti jako $v = \Delta l / \Delta t$ a výpočtu vektorového součinu je velikost Coriolisovy síly rovna

$$\Delta F_C = 2\Delta m \cdot \omega v = 2 \frac{\Delta m}{\Delta t} \omega \Delta l = 2Q_m \omega \Delta l \quad (1.38)$$

Z rovnice (1.38) je zřejmé, že Coriolisova síla působící na každý element tekutiny, je úměrná hmotnostnímu průtoku. Na element tekutiny působí moment síly o velikosti

$$\Delta M = \Delta F_C l \quad (1.39)$$

kde l je rameno síly, tj. vzdálenost elementu o délce Δl od osy rotace. [6]



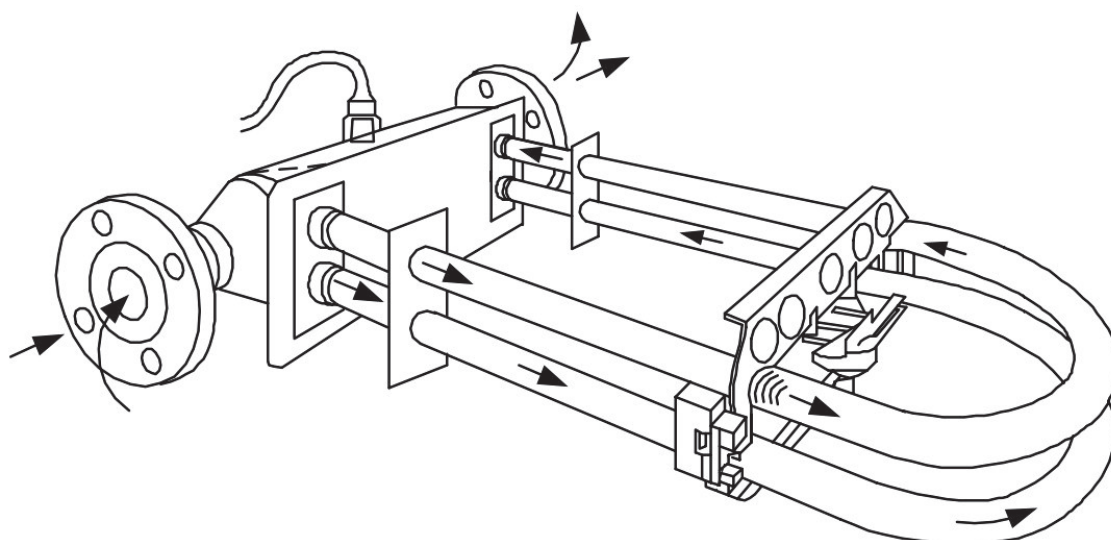
Obr. 1.23 K principu Coriolisova průtokoměru [6]

Celkový moment Coriolisovy síly, působící na potrubí o délce L , se pak určí integrací

$$M = \int_0^L \Delta M dl = 2Q_m \omega \int_0^L l dl = L^2 \omega Q_m \quad (1.40)$$

Provozní a metrologické vlastnosti Coriolisových průtokoměrů jsou závislé na geometrii měřicí trubice. Během vývoje těchto průtokoměrů vznikla celá řada různých tvarů trubic optimalizovaných pro specifické účely. V podstatě je však možné rozlišovat trubice zakřivené a trubice přímé. [2]

Základní konstrukce, která se uplatnila především u dřívějších Coriolisových průtokoměrů, využívá měřicí trubici ve tvaru písmene U (Obr. 1.24). Otáčivý pohyb je v tomto případě nahrazen harmonickým kmitáním trubice kolem své vertikální osy s úhlovou frekvencí ω . Směr vektorů ω a ΔF_C se tak v čase periodicky mění. Harmonického kmitání trubice lze docílit např. silovým působením elektromagnetu. Jako budící kmitočet se obvykle volí rezonanční kmitočet trubice. [6]

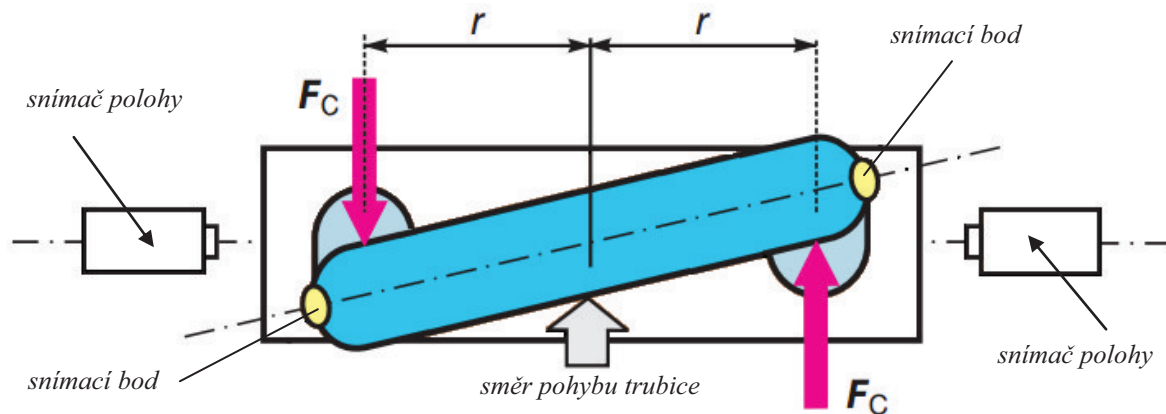


Obr. 1.24 Coriolisův průtokoměr s trubicí ve tvaru písmene U [12]

Při průtoku tekutiny kmitající trubicí začne na obě její ramena působit harmonicky proměnná Coriolisova síla, jejíž orientace ve vtokové části trubice bude opačná vzhledem k výtokové části (příčinou je opačný směr rychlosti tekutiny). Působením těchto sil vzniká harmonický krouticí moment ($2r\Delta F_C$), který způsobuje deformaci (zkroucení) U-trubice o úhel α . Maximální krouticí moment vzniká při maximální velikosti Coriolisovy síly, tj. při největší hodnotě ω , která nastává při průchodu středu trubice klidovou polohou. [6]

Maximum periodicky proměnného krouticího momentu, resp. deformace úměrná tomuto momentu, se vyhodnocuje prostřednictvím dvou snímačů polohy. Deformace trubice se snímá bezdotykově kapacitními, elektromagnetickými nebo optickými čidly. Signál ze snímačů je přímo úměrný hmotnostnímu průtoku.

Při pohybu trubice směrem nahoru (viz Obr. 1.25) indikuje průchod snímacího bodu nejdříve pravý detektor a za dobu Δt detektor levý. Doba Δt je pak úměrná hmotnostnímu průtoku. V případě nulového průtoku není trubice deformována a poloha obou snímacích bodů je detekována ve stejný časový okamžik, $\Delta t = 0 \rightarrow Q_m = 0$.



Obr. 1.25 Maximální deformace U-trubice Coriolisova průtokoměru a způsob jejího snímání [6]

Coriolisovy průtokoměry mají široké rozmezí uplatnění, od měření kapalného dusíku až po měření pastovitých hmot a kapalin s velkou viskozitou. Výhodou je jejich nezávislost na změnách tlaku, teploty, viskozity, hustoty a vodivosti media. Přesnost průtokoměrů se zakřivenou trubicí se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,5% z měřicího rozsahu, v případě přímých trubic 0,5 až 2%. [6]

1.12 TEPELNÉ HMOTNOSTNÍ PRŮTOKOMĚRY

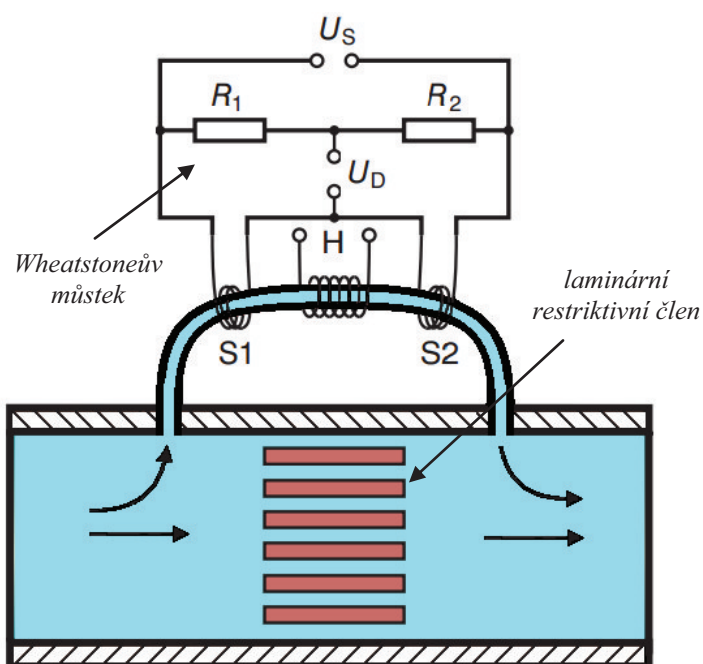
Tepelné hmotnostní průtokoměry jsou založeny na výměně tepla mezi zdrojem tepelné energie (elektricky vyhřívaným topným prvkem) a tekutinou. Vlivem proudící tekutiny dochází ke změnám rozložení teploty, které jsou úměrné hmotnostnímu průtoku Q_m . Tepelné hmotnostní průtokoměry se dělí do dvou skupin:

- 1) Kalorimetrické hmotnostní průtokoměry
- 2) Hmotnostní termoanemometry

1.12.1 Kalorimetrický hmotnostní průtokoměr

Kalorimetrický hmotnostní průtokoměr bývá často umístěn na tenké obtokové kapiláře. Kapilára je v prostřední části opatřena topným vinutím H a teplota stěny je měřena dvěma teplotními snímači S_1 a S_2 , jež jsou umístěny symetricky po obou stranách topného vinutí, viz Obr. 1.26 na další straně. [6]

Snímače jsou součástí Wheatstoneova můstku a mohou být realizovány termistory, platinovými odporovými teploměry, eventuálně termočlánky. Jestliže kapilárou neprotéká tekutina, je rozložení teplotního pole v kapiláře osově symetrické, a tedy teploty T_1 a T_2 obou snímačů jsou stejné. Pokud však průtokoměrem, a tedy i kapilárou, proudí tekutina, dojde vlivem konvekce k nerovnoměrnému rozložení teplotního pole a snímač S_1 bude měřit nižší teplotu než snímač S_2 (viz Obr. 1.27). Vlivem rozdílných teplot mají snímače rozdílný elektrický odpor. Dochází tedy k rozvážení Wheatstoneova můstku, které se projeví změnou napětí v příčné měřicí diagonále. [6]

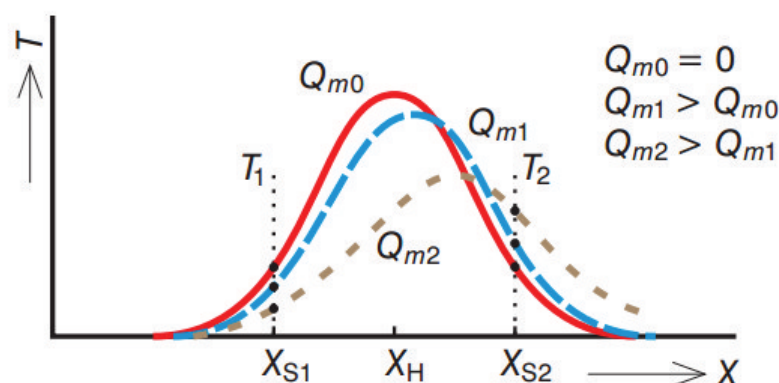


Obr. 1.26 Principiální schéma kalorimetrického průtokoměru [6]

Naměřené napětí, respektive rozdíl teplot ΔT , závisí v určitém rozsahu průtoků lineárně na hmotnostním průtoku tekutiny Q_m

$$\Delta T = T_2 - T_1 = A \cdot c_p \cdot P_E \cdot Q_m \rightarrow \sim U_D \quad (1.41)$$

kde $A [s^2 \cdot K^2 \cdot J^{-2}]$ je konstanta průtokoměru, $c_p [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ měrná tepelná kapacita a $P_E [W = J \cdot s^{-1}]$ příkon topného vinutí H . Tok v kapilárním potrubí musí být laminární, proto je nutné zajistit laminární proudění i v přímém potrubí, aby byl zachován konstantní poměr průtoku mezi kapilárou a přímým potrubím (typicky 1:100). Za tímto účelem se do přímé větve potrubí vřazuje laminární restriktivní člen tvořený kanálky. [6]

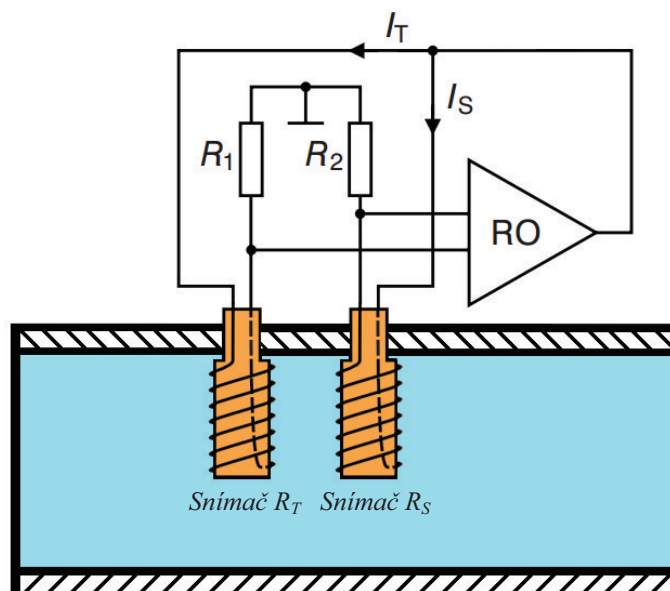


Obr. 1.27 Rozložení teploty v kapiláře pro různé hmotnostní průtoky [6]

Kalorimetrické průtokoměry se využívají při měření malých průtoků čistých kapalin a plynů v laboratorních podmínkách. Též se využívají jako indikátory průtoku při monitorování hydraulických systémů, odsávacích jednotek, mazacích okruhů apod. Přesnost se pohybuje v rozmezí 0,5% až 2%. [2][6]

1.12.2 Hmotnostní termoanemometr

Princip hmotnostního termoanemometru je založený na vyhodnocování chladicího účinku nucené konvekce na vyhřívaný snímač, tzv. anemometr. Základní uspořádání průtokoměru je na Obr. 1.28. V potrubí jsou umístěny dva snímače - odporové teploměry, jejichž elektrický odpor je značně odlišný, obvykle bývá poměr R_S ku R_T 1: 100. [6]



Obr. 1.28 Principiální schéma hmotnostního termoanemometru - RO = regulační obvod [6]

Snímače jsou zapojeny do můstku. Anemometrem tj. snímačem R_S , který má výrazně nižší hodnotu el. odporu, prochází v souladu se zvoleným poměrem odporů větší část proudu, čímž je vyhříván na vyšší teplotu. Teplota druhého (referenčního) snímače R_T

odpovídá vždy teplotě tekutiny, proto bývá tento snímač označován jako studené čidlo. Pokud průtokoměrem neproudí tekutina, je teplo z anemometru odváděno pouze vedením a volnou konvekcí, elektrický proud do čidla se nemění. [6]

Při pohybu tekutiny je teplo odváděno nucenou konvekcí, čímž dochází k většímu ochlazení a to tím intenzivněji, čím je rychlost proudění větší. Regulační obvod udržuje konstantní rozdíl teplot obou snímačů změnou velikosti řídicího proudu, aby bylo napětí v diagonální větvi nulové a můstek byl vyvážen. Velikost řídicího proudu odpovídá hmotnostnímu průtoku Q_m . V rovnovážném stavu je množství tepla dodané ohřevem elektrickým proudem ($R \cdot I^2$) rovné množství tepla, které je odváděno tekutinou. Závislost proudu I na Q_m je možné aproximovat rovnicí

$$I_s = A + B \cdot \sqrt{Q_m} \quad (1.42)$$

kde A je konstanta respektující přestup tepla do okolí při nulovém průtoku (kondukcí a radiací) a B konstanta zohledňující konstrukci snímače teploty, hustotu, viskozitu a tepelné vlastnosti měřené tekutiny. [2][6]



Obr. 1.29 Tepelný průtokoměr firmy Bronkhorst [20]

2 METODY ŘEŠENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ

V současné době existuje velmi široké spektrum metod, které umožňují efektivně řešit technické problémy z oblasti elektromagnetických polí. Jedná se bez výjimky o metody numerické, neboť nalézt analytické řešení Maxwellových rovnic (a z nich odvozených matematických výrazů) pro úlohu z technické praxe, je fakticky nemožné.

Před volbou konkrétní numerické metody je vždy nutné zformulovat spojitý a fyzikálně korektní model řešeného technického problému, na jehož základě lze sestavit model matematický, resp. numerický (diskrétní). Spojitý i numerický model lze různými způsoby zjednodušovat, např. úpravou geometrie, zanedbáním méně významných jevů, časových, prostorových či jiných změn, využitím symetrie apod., avšak nikoliv na úkor fyzikální reality a přesnosti řešení.

Numerické metody umožňují určit hledané fyzikální veličiny v konečném počtu diskrétních bodů (uzlů) tzv. definiční oblasti Ω , kterou představuje geometrie numerického modelu. Mezi těmito body jsou hodnoty hledaných veličin zpravidla vhodným algoritmem interpolovány. Vlastní výpočet probíhá řešením soustavy lineárních či nelineárních algebraických rovnic (v ustáleném stavu) nebo v případě časově proměnlivých veličin formou rovnic diferenciálních, taktéž lineárních či nelineárních.

Mezi nejpoužívanější a nejefektivnější numerické algoritmy patří:

- 1) metoda konečných prvků MKP (Finite Element Method - FEM),
- 2) metoda hraničních prvků MHP (Boundary Element Method - BEM),
- 3) metoda konečných objemů (Finite Volume Method - FVM),
- 4) metoda Monte Carlo (Monte Carlo Method - MCM)
- 5) kolokační metoda (Collocation Method)
- 6) metoda konečných diferencí MKD (Finite Differences Method - FDM)

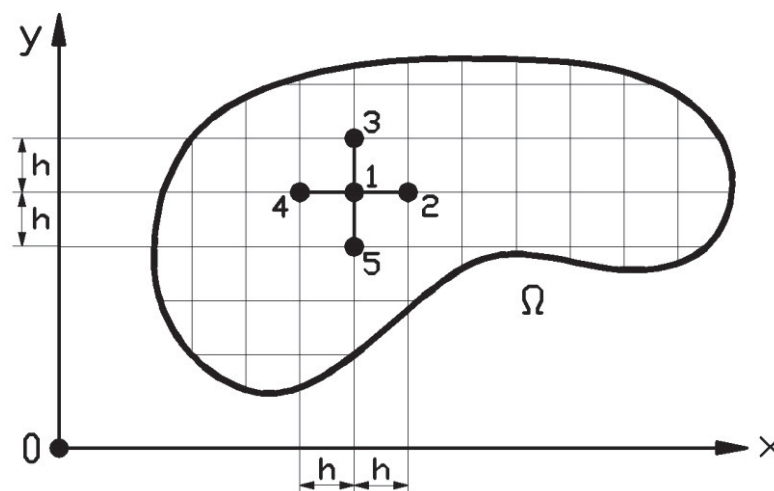
2.1 METODA KONEČNÝCH DIFERENCÍ - MKD

Metoda konečných diferencí, též označována jako metoda sítě, má dvě nesporné výhody: univerzálnost a jednoduchost numerického algoritmu. V technické praxi ji lze aplikovat na méně náročné problémy, z důvodu značné výpočetní náročnosti a také obtížné realizace složitých definičních oblastí. K zajištění dostatečné přesnosti je totiž potřebný

pravidelný odstup (krok) uzlů diskretizační sítě. V případě nerovnoměrných sítí nastává též problém s aproximací hraničních podmínek. Princip metody lze názorně demonstrovat na 2D okrajové úloze pro el. potenciál. Za předpokladu nulové hustoty náboje platí v definiční oblasti Ω Laplaceova parciální diferenciální rovnice ve tvaru

$$\Delta\varphi = \nabla^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.1)$$

Postup řešení je následující: definiční oblast Ω se proloží např. čtvercovou sítí s krokem h , následně se v každém vnitřním uzlu sítě (tzv. regulárních bodech) aproximuje Laplaceova rovnice rovnicí algebraickou podle zvoleného diferenčního schématu, viz Obr. 2.1. Obdobně v každém hraničním uzlu (tj. v uzlu, který leží na hranici nebo na rozhraní dvou podoblastí) se nahradí hraniční podmínky algebraickými aproximacemi. [11]



Obr. 2.1 Metoda konečných diferencí MKD - pětibodové diferenční schéma [11]

Potenciály φ_2 a φ_4 lze pomocí potenciálu φ_1 vyjádřit Taylorovým rozvojem pro první tři členy, analogický způsob odvození platí i pro potenciály φ_3 a φ_5 ve směru osy y

$$\varphi_2 \doteq \varphi_1 + h \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \frac{h^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

$$\varphi_4 \doteq \varphi_1 - h \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \frac{h^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}$$

Součtem rovnic (2.2) a po jednoduché úpravě

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{h^2} (\varphi_2 + \varphi_4 - 2 \cdot \varphi_1) \quad (2.3)$$

Jednotlivé elementy konečně prvkové sítě jsou spojeny v uzlech (uzlových bodech) o známých souřadnicích, ve kterých jsou numericky počítány hledané fyzikální veličiny. Metoda konečných prvků v současné době představuje nejrozšířenější numerickou metodu pro řešení inženýrských problémů. Její algoritmy jsou součástí všech profesionálních programů pro řešení elektromagnetických a jiných fyzikálních polí (teplotních, deformačních, atd.) jako jsou Ansys Multiphysics, Comsol Multiphysics či QuickField.

2.2.1 Matematický princip metody konečných prvků

Matematickým základem metody konečných prvků jsou tzv. variační principy. Úlohu řešení parciální diferenciální rovnice lze převést na ekvivalentní variační problém - tedy hledání funkce Φ , která zpravidla minimalizuje jistý integrál, tzv. funkcionál $F(\Phi)$. Přehled jednotlivých funkcionálů udává Tab. 2.1.

Název rovnice	Parciální diferenciální rovnice	Variační princip - Funkcionál
Nehomogenní vlnová rovnice	$\nabla^2 \Phi + k^2 \cdot \Phi = g$	$F(\Phi) = \frac{1}{2} \int_V [\nabla \Phi ^2 - k^2 \cdot \Phi^2 + 2 \cdot g \cdot \Phi] dV$
Homogenní vlnová rovnice	$\nabla^2 \Phi + k^2 \cdot \Phi = 0$	$F(\Phi) = \frac{1}{2} \int_V [\nabla \Phi ^2 - k^2 \cdot \Phi^2] dV$
Difúzní rovnice, rovnice pro vedení tepla	$\nabla^2 \Phi - k \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$	$F(\Phi) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^t \int_V [\nabla \Phi ^2 - k \cdot \Phi \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t}] dV dt$
Poissonova rovnice	$\nabla^2 \Phi = \Delta \Phi = g$	$F(\Phi) = \frac{1}{2} \int_V [\nabla \Phi ^2 + 2 \cdot g \cdot \Phi] dV$
Laplaceova rovnice	$\nabla^2 \Phi = \Delta \Phi = 0$	$F(\Phi) = \frac{1}{2} \int_V [\nabla \Phi ^2] dV$

Tab. 2.1 Přehled základních parciálních diferenciálních rovnic a jejich funkcionálů

Pro stacionární elektrická a magnetická pole lze vyjít z Thompsonova variačního principu: veličiny příslušného pole (el. potenciál, intenzita, indukce) nabývají takových hodnot, že při daných podmínkách je minimální rozdíl mezi energií elektrické pole W_e (popř. mag. pole W_m) a energií W , která musela být vynaložena na vytvoření zdrojů pole (tj. daného rozložení el. nábojů nebo proudů). Vyjádřeno symbolicky

$$W_e - W = \min. \quad W_m - W = \min. \quad (2.7)$$

Rozdíl energie na levé straně rovnice (2.7) je z matematického hlediska funkcionálem příslušné veličiny pole a nazývá se energetický funkcionál. [10]

Na základě Thompsonova variačního principu lze např. pro el. potenciál φ rovinného elektrostatického pole vyjádřit příslušné energetické funkcionály ve tvaru

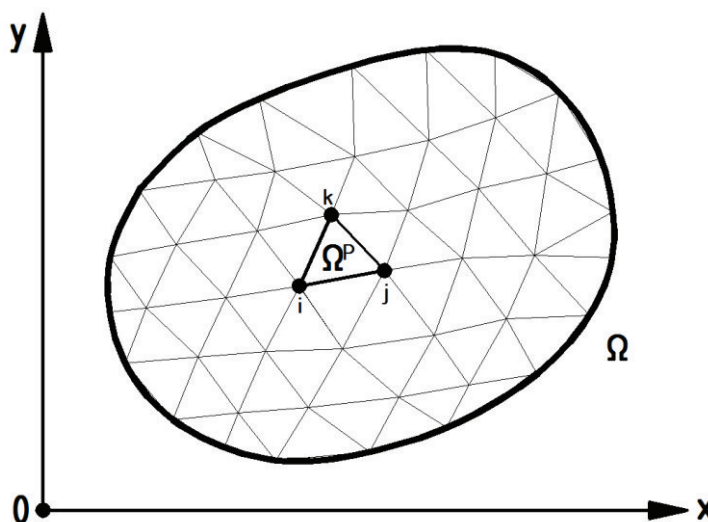
$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \rightarrow F(\varphi) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \varepsilon \left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y} \right)^2 \right] d\Omega - \int_{\Omega} \rho\varphi d\Omega$$

$$\Delta\varphi = 0 \rightarrow F(\varphi) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \varepsilon \left[\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y} \right)^2 \right] d\Omega$$
(2.8)

Z matematických výrazů (2.8) je patrná formální shoda s funkcionály pro Poissonovu a Laplaceovu rovnici z Tab. 2.1. Podstatou MKP je tedy minimalizace energetického funkcionálu, tj. v případě 2D úlohy pro el. potenciál nalezení numerické funkce $\varphi(x, y)$ takové, pro kterou bude výsledný rozdíl energií určený funkcionály (2.8) minimální.

2.2.2 Algoritmus metody konečných prvků pro 2D okrajovou úlohu

- 1) V první fázi se provádí diskretizace definiční oblasti Ω na konečný počet prvků Ω^P ($p = 1, 2, \dots, Q$). V případě využití trojúhelníkových elementů se tento proces označuje jako triangulace (Obr. 2.3). Libovolné dva rovinné elementy mají buď společný uzel či stranu, anebo jsou disjunktní (nemají žádný společný bod).



Obr. 2.3 Metoda konečných prvků MKP - triangulace definiční oblasti Ω [10]

Diskretizace je prováděna tak, aby žádný z elementů nebyl protínán případným rozhraním. Křivočaré rozhraní resp. hranice definiční oblasti se aproximuje lomenou čarou, tvořenou stranami hraničních elementů. Poloha každého uzlového bodu je charakterizována souřadnicemi zvoleného souřadnicového systému (kartézského, cylindrického

apod.). Pro každý element Ω^p se dále volí typ, resp. stupeň polynomu $u^p = P^p(x, y)$, jímž má být v uzlech sítě aproximována hledaná fyzikální veličina $u - \varphi(x, y)$, $A_z(x, y)$ atd. Definují se též uzlové parametry, tj. funkční hodnoty u popř. její parciální derivace podle souřadnic v uzlových bodech, kterými musí být jednoznačně určena aproximační funkce u^p . Uzlovým bodům, v nichž jsou uzlové parametry neznámé, se přiřazují pořadová čísla $m = 1, 2, \dots, N$, ostatním uzlům sítě pak pořadová čísla $m = N + 1, \dots, M$. [10]

- 2) Na celé definiční oblasti Ω se hledaná funkce u po částech aproximuje zvoleným typem polynomu (tvz. bázovou funkcí nebo též funkcí tvaru)

$$u = u^p = P^p(x, y) \text{ pro } \Omega^p \quad p = 1, 2, \dots, Q \quad (2.9)$$

Hodnoty (popř. parciální derivace) uzlových parametrů na hranicích sousedních elementů se pokládají sobě rovny, čímž se docíluje spojitosti funkce u . Hledanou funkci u lze na každém z trojúhelníků Ω^p aproximovat například lineárním polynomem

$$u^p = a^p + b^p x + c^p y \quad p = 1, 2, \dots, Q \quad (2.10)$$

Koeficienty a^p , b^p , c^p získáme řešením lineární soustavy algebraických rovnic pro všechny tři uzly i, j, k trojúhelníkového elementu

$$\begin{aligned} u_i &= a^p + b^p x_i + c^p y_i & u_j &= a^p + b^p x_j + c^p y_j \\ u_k &= a^p + b^p x_k + c^p y_k \end{aligned} \quad (2.11)$$

Počet členů polynomu závisí na počtu uzlů. V případě čtyřúhelníkového elementu se čtyřmi uzly má tedy polynom prvního stupně tvar

$$u^p = a^p + b^p x + c^p xy + d^p y \quad p = 1, 2, \dots, Q \quad (2.12)$$

- 3) Minimalizovaný funkcionál (2.8) se vyjádří ve tvaru

$$\begin{aligned} F &= \sum_{p=1}^Q F^p \\ F^p &= \int_{\Omega_p} \frac{1}{2} k \left[\left(\frac{\partial u^p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u^p}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy - \int_{\Omega_p} f^p u^p dx dy \end{aligned} \quad (2.13)$$

kde F^p jsou příspěvky od jednotlivých elementů Ω^p .

- 4) Dosazením aproximace funkce u podle vztahu (2.10) do funkcionálu (2.13) dostáváme funkci F , jejímiž proměnnými jsou uzlové parametry. Nutné podmínky pro její extrém (tj. minimum) dávají soustavu algebraických rovnic, jejímiž kořeny jsou hledané hodnoty uzlových parametrů, tj. hodnoty hledané fyzikální veličiny

$$\frac{\partial F}{\partial u_m} = 0, \quad m = 1, 2, \dots, N \quad \rightarrow \quad \sum_{p=1}^Q \frac{\partial F^p}{\partial u_m} = 0 \quad (2.14)$$

kde u_m představuje neznámé funkční hodnoty v uzlech m . Následným výpočtem parciálních derivací $\partial F^p / \partial u_m$ a po několika dalších úpravách lze algebraickou soustavu rovnic (2.14) vyjádřit v maticovém tvaru

$$\mathbf{A}_0 \mathbf{U}_0 = \mathbf{F}_0 \quad (2.15)$$

kde \mathbf{U}_0 představuje sloupcový vektor s prvky u_1, u_2, \dots, u_N . Matice \mathbf{A}_0 má opět pásový charakter. Podrobný postup odvození se všemi dílčími kroky viz [10], str. 406 až 411.

2.2.3 Porovnání MKP a MKD, adaptivní algoritmy vytváření sítě

Hlavní výhodou MKP oproti MKD je zejména možnost přizpůsobení diskretizační sítě geometricky složitým definičním oblastem Ω (snadnou aproximací hranic a volbou lokálních nerovnoměrností sítě) a automatické splnění podmínek na rozhraní dvou prostředí. MKD je vázána především na pravoúhlé a pravidelné oblasti. MKD aproximuje parciální diferenciální rovnici s příslušnými okrajovými podmínkami diferenčními vztahy, zatímco MKP přímo aproximuje její řešení a to na celé definiční oblasti (nikoliv jen v uzlových bodech).

Současné MKP programy umožňují tvorbu sítě interaktivně (uživatel si sám konfiguruje vlastnosti sítě - typ, tvar, velikost a hustotu elementů) nebo adaptivně. Ve druhém případě uživatel vytvoří hrubou síť a poté jsou aplikovány adaptivní iterační algoritmy, které sami vyhodnocují velikost chyby řešení na jednotlivých elementech, podle kterých je následně modifikována výchozí síť. Diskretizační chybu adaptivní MKP analýzy lze snižovat různými způsoby: použitím hustější diskretizační sítě, tj. navyšováním počtu elementů a uzlů při stejném stupni aproximačního polynomu (tzv. *h-metoda*), při stejné hustotě sítě zvyšováním stupně aproximačního polynomu (tzv. *p-metoda*), relokací pozice uzlů sítě (tzv. *r-metoda*) a též kombinacemi těchto metod (*hp*, *hr* a *hpr-metody*).

3 INDUKČNÍ (ELEKTROMAGNETICKÉ) MĚŘIČE PRŮTOKU

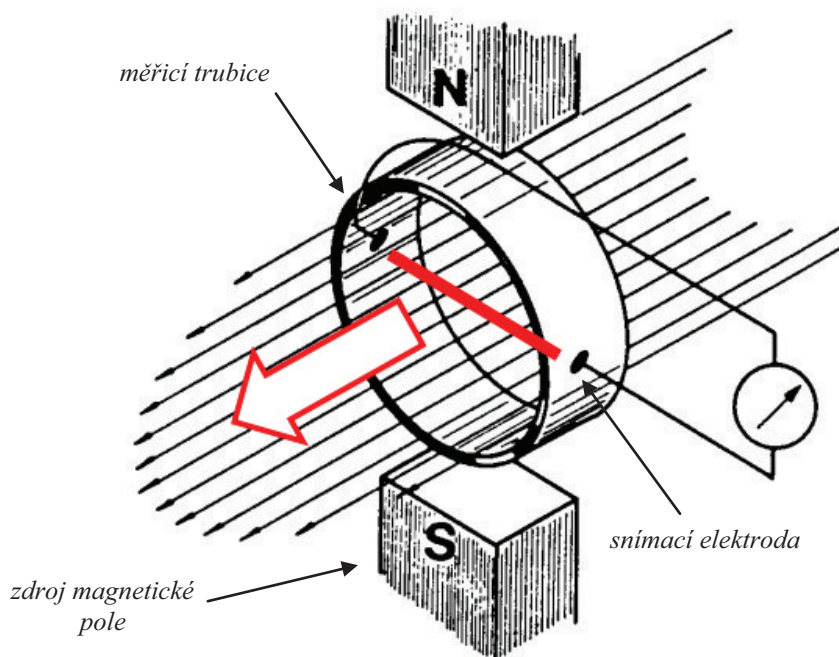
Tato kapitola obsahuje obecný přehled o indukčních průtokoměrech, které umožňují měřit objemový průtok elektricky vodivých kapalin. Pozornost je věnována především základním konstrukčním částím jejich čidla v průtočném provedení, jehož numerická analýza je hlavní náplní této diplomové práce (viz kap. 4 a 5).

3.1 PRINCIP INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU

Princip indukčních (elektromagnetických) průtokoměrů, resp. jejich čidla, je možné vysvětlit na základě Faradayova zákona o elektromagnetické indukci při pohybu vodiče v magnetickém poli. Elektricky vodivou kapalinu lze nahradit myšleným vodičem, který se pohybuje ve směru kolmém k jeho délce a zároveň ve směru kolmém k siločarám magnetického pole (Obr. 3.1). Důsledkem tohoto pohybu vzniká na koncích vodiče rozdíl potenciálů, tj. dochází k indukci elektrického napětí, jehož velikost je (za jistých předpokladů) vyjádřena vztahem

$$\Delta U = B \cdot D \cdot \bar{v} = \frac{4B}{\pi D} \cdot Q_V [V] \rightarrow Q_V [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (3.1)$$

kde $D [m]$ je délka vodiče, resp. vzdálenost elektrod (průměr potrubí) a $B [T]$ magnetická indukce. Výstupní signál čidla je tedy lineární funkcí rychlosti proudění, resp. průtoku Q_V .



Obr. 3.1 Základní uspořádání čidla indukčního průtokoměru

Názornější (a údajně fyzikální podstatě bližší) je vysvětlení vzniku napětí na elektrodách jako důsledku působení Lorentzových sil. Na ionty a elektrony v kapalině, tj. na náboje q pohybující se v magnetickém poli, působí magnetická síla, která je vychyluje směrem k elektrodám. Tato síla je dána vektorovým součinem

$$\mathbf{F}_m = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \mathbf{v} \perp \mathbf{B} \rightarrow |\mathbf{v} \times \mathbf{B}| = v \cdot B \quad (3.2)$$

Vychýlené náboje opačných polarit vytvářejí rozdíl potenciálů - napětí ΔU . Intenzita takto vzniklého elektrického pole je za předpokladu jeho homogenity určena vztahem

$$|\mathbf{E}| = \frac{\Delta U}{D} \quad (3.3)$$

Na náboje v elektrickém poli podle Lorentzova vztahu působí elektrická síla. Tato síla má opačný směr než síla vyvolaná magnetickým polem a platí pro ni vztah

$$\mathbf{F}_e = q \cdot \mathbf{E} \quad (3.4)$$

Rovnováha nastane při rovnosti obou výše uvedených sil, takže pro homogenní magnetické i elektrické pole platí pro napětí mezi elektrodami formálně shodný vztah s rovnicí (3.1)

$$|\mathbf{F}_m| = |\mathbf{F}_e| = |\mathbf{v} \times \mathbf{B}| = |\mathbf{E}| \Rightarrow \Delta U = v \cdot B \cdot D [V] \quad (3.5)$$

Je nutné zdůraznit, že rovnice (3.1) respektive (3.5) pro indukované napětí ΔU platí pouze v případě homogenního magnetického pole ve vnitřním objemu měřicí trubice, bodových elektrodách a při osově symetrickém rychlostním profilu měřené kapaliny. [2]

3.2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI ČIDLA INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU

Jak je patrné z Obr. 3.1 mezi základní části čidla indukčního měřiče průtoku patří zdroj magnetického pole (budicí cívky, eventuelně permanentní magnety), měřicí trubice a zpravidla dvojice snímacích elektrod, ze kterých je měřený signál vyveden na vstup elektronických obvodů. V čidle neboli primární části indukčního průtokoměru tedy dochází k transformaci neelektrické veličiny - rychlosti proudění - na elektrický signál. Sekundární část, jež je tvořena elektronickými obvody, pak zprostředkovává buzení magnetického pole a vyhodnocuje průtok a proteklé množství kapaliny na základě naměřených hodnot indukovaného napětí ΔU .

Mezi nejběžnější a nejpoužívanější konstrukční provedení indukčních průtokoměrů patří měřidla s průtočnou měřicí trubicí (Obr. 3.2). Kromě těchto průtokoměrů existují i další konstrukční varianty, které jsou přizpůsobené specifickým druhům a parametrům měřených kapalin a různým provozním podmínkám (např. průtokoměry pro částečně zaplněná potrubí). Konstrukčně odlišné jsou též indukční průtokoměry určené pro měření místní rychlosti průtoku. Obecně lze indukční průtokoměry vyráběné pro průmyslové aplikace rozdělit do pěti základních skupin: na průtokové (Obr. 3.2, Obr. 3.3), ponorné, zásuvné, bodové a plošné. Podrobnější informace o jednotlivých skupinách jsou uvedeny např. v publikaci [2] na str. 173 až 177.



Obr. 3.2 Indukční průtokoměr Flonet firmy Elis Plzeň a.s. [24]

3.2.1 Zdroj magnetického pole

Zdrojem magnetického pole bývají nejčastěji dvě budící cívky umístěné na povrchu měřicí trubice. Tvar cívek je optimalizován s ohledem na vytvoření rovnoměrného mag. pole s kolmou složkou mag. indukce vůči proudící kapalině. Zpravidla se používají sedlové cívky (Obr. 3.3) nebo obdélníkové a válcové cívky, které mohou být samonosné (zpevněné impregnací - epoxidem) nebo navinuté na kostrách. Sedlové cívky se nejdříve navinou, případně se navíc omotají bandáží, následně jsou ohnuty podle profilu měřicí trubice a poté impregnovány. Magnetický obvod čidla může být doplněn také feromagnetickými prvky

(jádry cívek, pólovými nástavci apod.), jejichž konfigurace se volí tak, aby se dosáhlo při daném budícím proudu (resp. magnetomotorickém napětí) co největších hodnot mag. indukce v oblasti měření. Některé indukční průtokoměry mohou být vybaveny též permanentními magnety, avšak z hlediska problematiky potlačování rušivých signálů jsou výhodnější průtokoměry s elektronicky buzenými cívkami a časově proměnným magnetickým polem (detailněji viz podkapitola 3.3). Napájení průtokoměrů může být realizováno přímo z rozvodné sítě nebo pomocí bateriových článků.



Obr. 3.3 Sedlové cívky (SolidWorks 2010) a indukční průtokoměr Sitrans F s čidlem 911/E firmy Siemens [25]

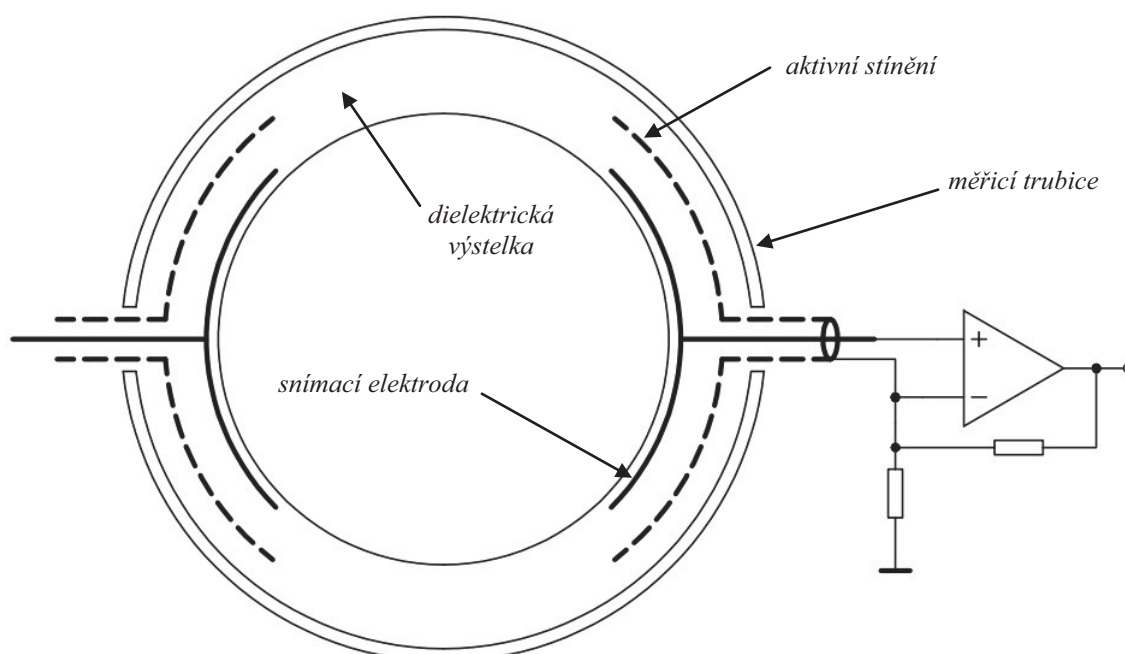
3.2.2 Měřicí trubice

Z principu činnosti indukčního průtokoměru vyplývá, že nesmí dojít k elektricky tvrdému vodivému spojení mezi snímacími elektrodami, které by vedlo k vyzkratování nebo zásadnímu poklesu amplitudy měřeného signálu. Z tohoto důvodu musí být měřicí trubice čidla zhotovená z elektricky nevodivého materiálu. Vzhledem k tomu, že trubice musí vykazovat značnou mechanickou pevnost a také odolnost pro práci při vysokých teplotách, používá se jako výchozí materiál zpravidla legovaná nerezová ocel (pro méně náročné provozní podmínky např. hliník). Ocel je elektricky vodivá, a proto se vnitřek měřicí trubice vybavuje izolační výstelkou (vločkou), z materiálu chemicky kompatibilního s měřenou kapalinou (viz Obr. 3.3). Aby se vybuzený magnetický tok uzavíral přes průtočný průřez a nikoliv přes stěny ocelové trubice, nesmí být použita feromagnetická ocel. [1][2]

Izolační výstelka může být zhotovena z měkké nebo tvrdé pryže, polyethylenu, polyuretanu, dále z teflonu, smaltu apod. Pro náročné aplikace (např. měření průtoku kyselin či alkalických roztoků) se využívá měřicí trubice zhotovená přímo z izolačního materiálu, zpravidla z keramiky. V případě méně náročných pracovních podmínek se používají plasty vyztužené skelnými vlákny. Výstelkou nejsou opatřeny el. vodivé trubice indukčních průtokoměrů určených pro měření průtoku tekutých kovů (sodík, olovo). [1]

3.2.3 Snímací elektrody

Obvykle jsou snímací elektrody v přímém kontaktu s měřenou kapalinou, mohou být vyměnitelné (šrouby s vhodně tvarovanou hlavou) nebo pevné (vyrábí se např. spékáním kapky tekuté platiny s keramickou výstelkou). Jako materiál elektrod se zpravidla využívá korozivzdorná nemagnetická ocel, pro agresivní kapaliny platina, slitiny na bázi niklu, dále tantal, titan, zirkon apod. Tvar elektrod je většinou kruhový malého průměru ($5 \div 20$ mm). Některé konstrukce využívají bezkontaktní snímání pomocí kapacitně vázaných elektrod (v podobě tenkých kovových vrstev), které jsou součástí výstelky (Obr. 3.4). Indukční průtokoměry vybavené těmito elektrodami mohou měřit průtoky kapalin, jež mají až stokrát menší elektrickou vodivost, než jaká je potřebná pro práci průtokoměrů s běžnými elektrodami a běžnou výstelkou. [1][2]



Obr. 3.4 Princip bezkontaktního snímání indukovaného napětí [4]

Amplituda měřeného signálu je značně ovlivněna usazeninami a nečistotami na snímacích elektrodách a vnitřních stěnách měřicí trubice. Usazeniny zmenšují průtočný

průřez, čímž zvyšují rychlost proudění kapaliny, a tedy i velikost indukovaného napětí. V konečném důsledku tak indukční průtokoměr měří větší objemový průtok, neboť předpokládá nezměněný průtočný průřez. Usazeniny mohou být též zdrojem rušivých signálů, a pokud jsou elektricky vodivé, mohou v krajním případě způsobit krátké spojení elektrod se zemnicím kontaktem a vyřadit průtokoměr z činnosti. Proto je nutné, v případě měření průtoku kapalin vytvářejících povlaky usazenin, měřicí trubici a snímací elektrody v pravidelných intervalech čistit. [1][2]

Čištění měřicí trubice může být provedeno mechanickou cestou pomocí kartáčů či škrabek, je však nutná demontáž čidla (pro zajištění nepřetržitého průtoku kapaliny musí být čidlo přemostěno obtokem). Usazeniny a nečistoty na snímacích elektrodách lze odstranit např. jejich spálením, konkrétně průchodem značného el. proudu mezi elektrodami, dále pomocí ultrazvuku (vibracemi) a také elektrochemicky - rozpuštěním povlaku elektrod (elektrické napětí se připojuje mezi elektrody a zemnicí kontakt). Vhodným prostředkem odstraňování následků usazenin je též zvýšení rychlosti proudění nebo použití speciálních elektrod, jejichž výměnu lze uskutečnit i za provozu průtokoměru. [1][2]

3.3 MĚŘICÍ OBVODY INDUKČNÍCH PRŮTOKOMĚRŮ

Hlavním úkolem měřicích obvodů je zvýšení poměru signál/šum. Na elektrodách čidla indukčního průtokoměru dochází k superpozici užitečného signálu a rušivých napětí, která mají původ v měřené kapalině (např. elektrochemické reakce, vzduchové kapsy atd.), vlastnostech potrubí a elektrod (vibrace, usazeniny) a v elektronických obvodech generujících časově proměnné magnetické pole (transformace rušivých napětí do citlivých částí měřicích obvodů, kolísání síťového napětí, indukce vířivých proudů apod.). [2]

3.3.1 Rušivé složky měřeného signálu

Pro časový průběh měřeného signálu $u_{ms}(t)$ na elektrodách lze tedy psát rovnici

$$u_{ms}(t) = u_{us}(t) + u_{rsa}(t) + u_{rss}(t) + U_{rSS} \quad (3.6)$$

kde $u_{us}(t)$ představuje užitečný signál úměrný střední rychlosti proudění, $u_{rsa}(t)$ souhrnný účinek rušivých střídavých napětí asynchronních vůči časovému průběhu mag. indukce $B(t)$. Složka $u_{sts}(t)$ odpovídá střídavým rušivým napětím se shodným kmitočtem jako $B(t)$ a složka U_{rSS} stejnosměrným a pomalu se měnícím rušivým napětím. [2]

Stejnoseměrná složka U_{rSS} je vyvolána především elektrochemickými a elektrostatickými jevy, případně termoelektrickými jevy (vznik elektrochemického napětí, polarizace elektrod, styk dvou vodičů z různého materiálu) a kontaktními potenciály. Asynchronní rušení $u_{rsa}(t)$ je způsobeno především průnikem napětí o síťovém kmitočtu na vstup zesilovače kapacitní nebo induktivní vazbou. Z tohoto důvodu se volí kmitočet budicího proudu tak, aby se lišil od síťového kmitočtu a jeho celočíselných násobků. Synchronní rušení $u_{rSS}(t)$ vzniká např. elektromag. indukcí do smyčky tvořené přívodou od snímacích elektrod ke vstupu zesilovače, a dále elektromag. indukcí napětí do elektricky vodivé kapaliny, jež má za následek vznik vířivých proudů. [2]

3.3.2 Způsoby buzení magnetického pole indukčního průtokoměru

Časově konstantní magnetické pole (permanentní magnety, nebo $i_b(t) = konst.$) je vhodné pro měření velmi rychlých změn (pulzací) rychlosti proudění kapaliny, avšak v praxi se u indukčních průtokoměrů téměř nevyužívá (pouze u měření průtoku tekutých kovů). Problémem jsou stejnosměrné rušivé složky napětí (viz předchozí podkapitola), které nelze z měřeného signálu odstranit, a obtížná realizace stejnosměrných zesilovačů pro zpracování velmi malých úrovní indukovaného napětí (napětíový drift zesilovačů), navíc dochází k rapidnímu snižování životnosti snímacích elektrod vlivem elektrolýzy. Na činnost indukčního průtokoměru s časově konstantním mag. polem může mít též negativní vliv i kolísání intenzity zemského magnetického pole. [2]

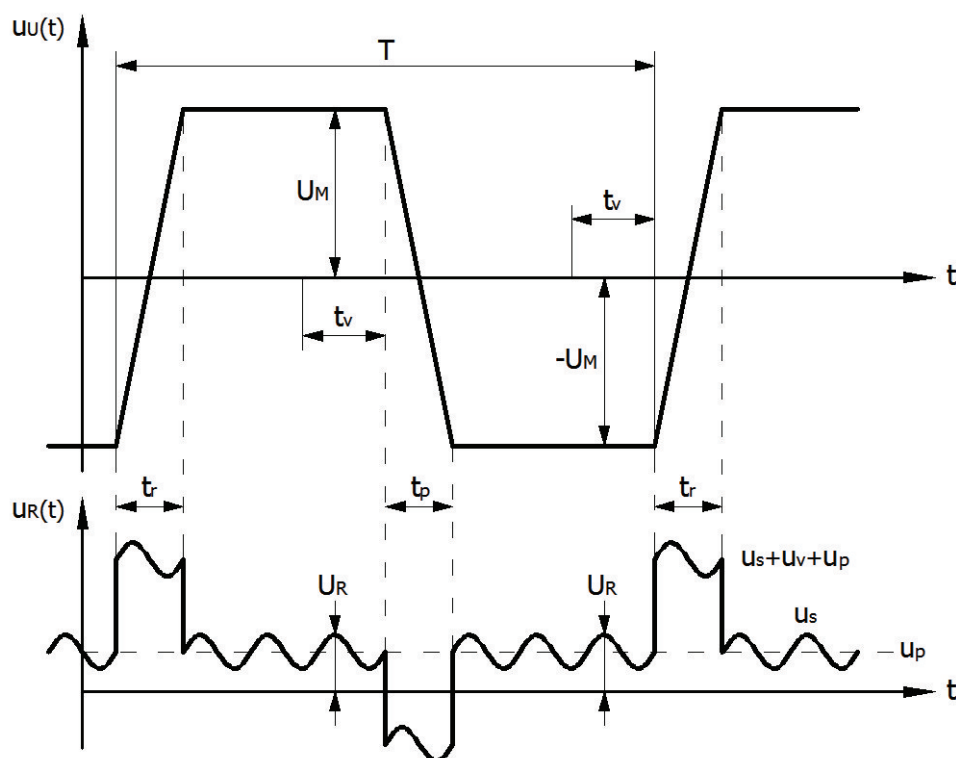
Indukční průtokoměry proto využívají především časově proměnné magnetické pole, které umožňuje oddělit stejnosměrná rušivá napětí filtrací a aplikaci střídavých zesilovačů vylučujících samovolný posuv nuly. Vzhledem k tomu, že složky synchronního rušení jsou úměrné časové derivaci dB/dt , je nejvýhodnější měřit (vzorkovat) napětí na snímacích elektrodách v časových intervalech při $B(t) = konst.$, tímto postupem se získá užitečný signál nezatížený synchronním rušením. Nejčastěji se tedy používají obdélníkové nebo lichoběžníkové průběhy budicího proudu $i_b(t)$, respektive mag. indukce $B(t)$, detailněji viz následující podkapitola 3.3.3.

Jiný způsob odstranění složek synchronního rušení umožňují trojúhelníkové a exponenciální průběhy budicího proudu $i_b(t)$. Podstatný rozdíl je v tom, že se nepracuje se vzorky signálu, ale měřený signál (včetně rušivých složek) se v čase integruje. Některé průtokoměry využívají k buzení proud harmonického průběhu s frekvencí shodnou

s napětím rozvodné sítě. I v tomto případě lze synchronní rušivé složky snadno potlačit (např. prostřednictvím koherentní demodulace), neboť jsou fázově posunuty oproti užitečnému signálu o 90° . [2]

3.3.3 Lichoběžníkový průběh magnetické indukce $B(t)$

Časový průběh napětí na snímacích elektrodách při lichoběžníkovém průběhu magnetické indukce $B(t)$ ilustruje Obr. 3.5. Lichoběžníkové impulsy budícího proudu mají nižší strmost náběžné a sestupné hrany než impulsy obdélníkové, a proto jsou částečně omezeny tlumené kmity, vznikající při přechodném ději vlivem indukčnosti a parazitních kapacit budících cívek, a tedy i derivační špičky měřeného signálu, které se dostávají na vstup zesilovače. Jak je patrné z Obr. 3.5, napětí příslušné vířivým proudům u_v vzniká pouze při růstu (časový úsek t_r) a poklesu (časový úsek t_p) magnetického pole.



Obr. 3.5 Idealizovaný časový průběh užitečné $u_U(t)$ a rušivé $u_R(t)$ složky napětí na snímacích elektrodách při buzení magnetického pole pomocí lichoběžníkových impulsů [2]

V časovém intervalu t_v , kdy dochází ke vzorkování signálu snímacích elektrod, je vybuzené magnetické pole již ustálené, $B(t) = konst$, a tedy $u_v = 0$. Složka rušivého napětí je tvořena pomalu se měnícím napětím u_p a průnikem síťového napětí u_s . Odečtením vzorků získaných při obou polaritách budícího proudu dojde k odstranění rušivých napětí a zároveň ke zdvojnásobení citlivosti čidla. Tuto skutečnost vyjadřuje vztah (3.7) na následující straně.

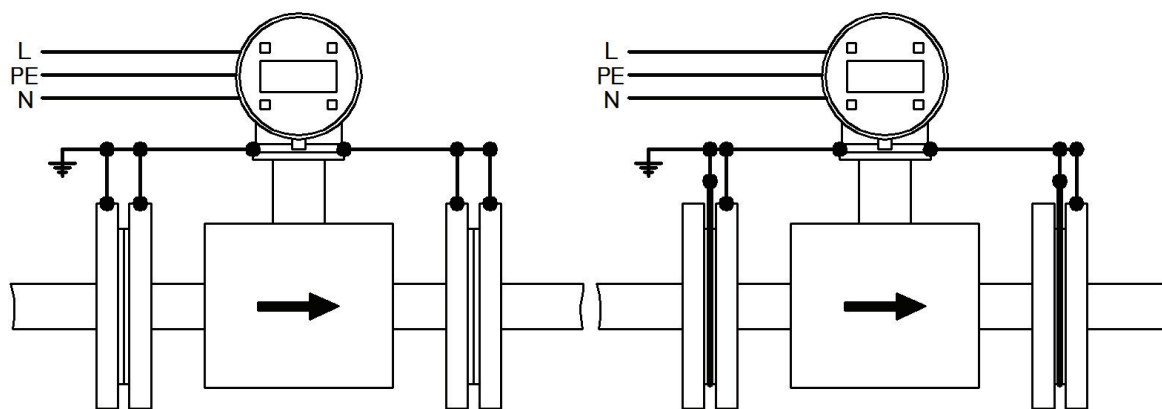
Princip odstranění rušení z měřeného signálu snímacích elektrod

$$(U_R + U_M) + (U_R - U_M) = 2 \cdot U_M \quad (3.7)$$

kde U_M odpovídá amplitudě užitečného signálu a U_R amplitudě rušivé složky.

Opakovací frekvence impulsů bývá, s ohledem na úsporu elektrické energie a na potlačení asynchronního rušení, desetina až šestina frekvence elektrické rozvodné sítě (5 ÷ 10 Hz). Doba trvání impulsů (periody) se volí tak, aby po odeznění přechodných dějů, byl k dispozici dostatečně dlouhý časový úsek s konstantní mag. indukcí, během kterého se provádí vzorkování měřeného signálu. Nevýhodou popsaného principu je pomalejší reakce průtokoměru na rychlé změny rychlosti proudění měřené kapaliny (z důvodu nízké opakovací frekvence), a proto není tento princip vhodný pro měření pulzujících průtoků.

Z hlediska potlačení asynchronní rušivé složky, tj. z hlediska potlačení průniku napětí síťového kmitočtu, je výhodné, aby jednotlivé úseky průběhu odpovídaly celočíselným násobkům periody sítě a začátek průběhu byl synchronizován s průchodem síťového napětí nulou. Pak je možné integrací měřeného signálu průnik rušivého napětí ze sítě vyloučit. Ke generování obdélníkových, lichoběžníkových a dalších typů impulsů se zpravidla používají spínané stejnosměrné zdroje. [2]



Obr. 3.6 Způsob uzemnění čidla indukčního průtokoměru v místě navazujícího potrubí

3.3.4 Zemnění čidla indukčního průtokoměru

Konstrukce průtokoměru musí být galvanicky spojena s měřenou kapalinou v místě navazujícího potrubí (před i za čidlem), zemním potenciálem a ochranným vodičem napájení. Zemnění průtokoměru zabraňuje akumulaci elektrických nábojů, chrání před průchodem bludných proudů a vytváří pevný vztažný potenciál měřicí soustavy. U přírubového provedení čidla spojeného s vodivým potrubím, je nutné galvanicky propojit obě

příruby a potrubí uzemnit (Obr. 3.6. vlevo) V případě nevodivého potrubí se el. potenciál kapaliny spojí s potenciálem země pomocí zemních kroužků (Obr. 3.6. vpravo).

3.4 APLIKACE A VLASTNOSTI INDUKČNÍCH PRŮTOKOMĚŘŮ

Indukční průtokoměry jsou vhodné pro měření všech elektricky vodivých kapalin (včetně newtonských), u kterých je vodivost větší než $1 \mu S \cdot cm^{-1}$. Výjimečně může hranice měřitelnosti dosahovat $0,1 \mu S \cdot cm^{-1}$. Indukčními průtokoměry tedy nelze měřit průtok elektricky slabě vodivých látek, jako jsou benzin či deionizovaná voda. Vodivost měřené kapaliny by měla být v celém průřezu průtokoměru konstantní. Pokud kapalina obsahuje směs látek o různé vodivosti, je nutné směs homogenizovat instalací míchadla před vtokem do čidla průtokoměru. Další omezení představuje přítomnost feromagnetických částic v měřené kapalině. Feromagnetické částice mohou způsobit deformaci rozložení vybuzeného magnetického pole do takové míry, že výsledky měření se stanou nereprodukovatelnými. Proto se indukčního principu měření průtoku využívá pouze pro diamagnetické a paramagnetické kapaliny ($\mu_r \leq 1$). [2]

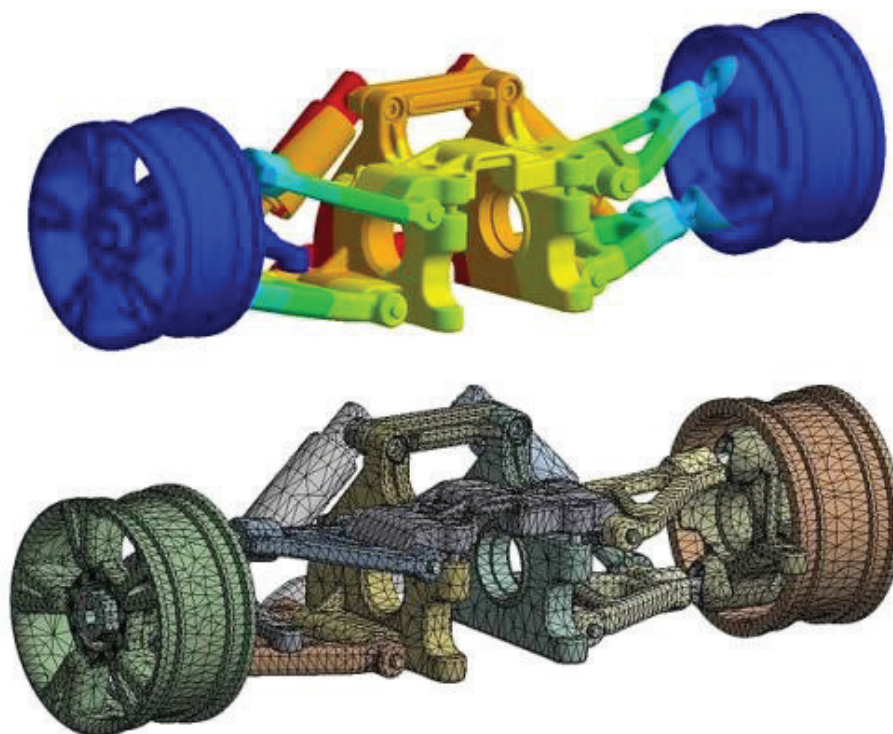
Indukčními průtokoměry lze měřit i průtok obtížně měřitelných kapalin, jako jsou látky s vysokou viskozitou, s velkým podílem sedimentujících částic, kašovitě směsi, kaly, apod., pro něž jsou klasické metody měření průtoku nepoužitelné. Jak již bylo uvedeno, indukční průtokoměry se používají též pro měření průtoku tekutých kovů. Měřená kapalina může obsahovat i pevné nemagnetické částice nebo bublinky vzduchu. Pokud jsou rovnoměrně rozptýleny a nevytvářejí spojitou izolující oblast, nemají na údaj měřidla rušivý vliv. Rovnoměrného rozptýlení je opět možné docílit mícháním. [6]

Měřicí rozsah indukčních průtokoměrů se přibližně pohybuje v rozmezí od $10^{-2} \div 10^5 m^3 \cdot h^{-1}$, rozsahy rychlostí bývají od 0,3 do $10 m \cdot s^{-1}$, nejistota $\pm 0,5\%$ z měřené hodnoty. Měřidla nevykazují tlakovou ztrátu, protože jejich konstrukční části (kromě elektrod) nezasahují do průtočného průřezu. Výhodou je necitlivost měřeného signálu na změny hustoty, viskozity a tlaku měřené kapaliny. Protože elektrická vodivost většiny kapalin roste s teplotou, je pro praxi zanedbatelný i vliv teploty, která je směrodatná jen při stanovení dolní meze elektrické vodivosti. Moderní průtokoměry jsou vybaveny diagnostickými systémy, které periodicky kontrolují napájení, budicí proud, linearitu měření, testují korozi a znečištění elektrod, poškození izolační výstelky, neúplné zaplnění čidla apod. [6]

4 NUMERICKÁ ANALÝZA MAGNETICKÉHO OBVODU ČIDLA INDUKČNÍHO MĚŘIČE PRŮTOKU V PROGRAMU ANSYS

4.1 MULTIFYZIKÁLNÍ PROGRAM ANSYS

K numerické simulaci rozložení magnetického pole řešeného indukčního průtokoměru byl využit multifyzikální program Ansys verze 13.0 v licenci Academic Research. Ansys je obecně nelineární konečně prvkový software schopný řešit fyzikální problémy z oblasti elektromagnetických polí, termodynamické a strukturální analýzy, akustiky a mechaniky kontinua. Ansys umožňuje nejen kontrolní výpočty, ale díky parametrizovaným výpočtovým modelům i citlivostní a optimalizační analýzy a rovněž výpočty spolehlivosti.



Obr. 4.1 Ukázka numerického modelu v Ansys Workbench [26]

Program Ansys v současné době obsahuje dvě základní grafická rozhraní, tzv. Ansys Mechanical APDL a Ansys Workbench, který má být novým grafickým rozhraním podobným nynějším CAD systémům. Ansys Workbench je stále ve stadiu vývoje a doposud do něj nebyly implementovány všechny funkce. Obě rozhraní fungují na sobě nezávisle, přičemž používají stejné části programu Ansys, např. řešiče. V této diplomové práci bylo využito klasické rozhraní Ansys Mechanical APDL vzhledem k možnosti tvorby skriptů a maker v parametrickém jazyku APDL (Ansys Parametric Design Language).

4.1.1 Postup při řešení konečně prvkové úlohy v programu Ansys

Podobně jako u většiny konečně prvkových softwarů (Comsol MultiPhysics, FEMM, Opera 3D atd.) probíhá i v programu Ansys řešení numerických simulací ve třech po sobě jdoucích etapách. První etapou je tzv. preprocessing, ve kterém si uživatel nejdříve zvolí z knihovny Ansysu tzv. element - soubor, ve kterém jsou zaimplementovány matematické rovnice a algoritmy pro řešení příslušného fyzikálního problému. Následuje konfigurace zvoleného elementu (tzv. DOFS - stupně volnosti a Real Constants - reálné konstanty, např. nastavení dimenze úlohy, symetrie, volba tvaru elementů sítě apod.), dále definice materiálových konstant a vytvoření geometrie řešené úlohy (popř. import geometrie vytvořené v některém z CAD programů). V rámci preprocessingu je dále nutné přiřadit jednotlivým entitám geometrie (bodům, liniím, plochám či objemům) příslušné elementy a materiálové konstanty. Posledním krokem je meshování, neboli tvorba konečně prvkové sítě prostřednictvím interaktivního nástroje Mesh Tool a nastavení fyzikálních veličin a hraničních podmínek do příslušných uzlů vygenerované sítě (tzv. Loads - např. budící proud, hustota náboje, teplota, síly, napětí, různé součinitele apod.).

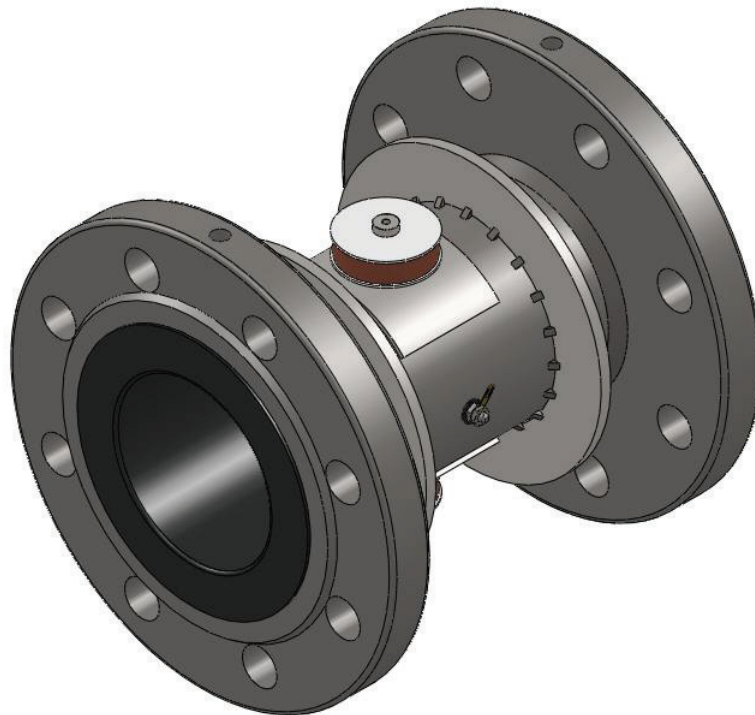
Ve druhé etapě řešení numerické simulace - solution processoru - uživatel specifikuje parametry analýzy (např. kritéria konvergence, typ úlohy: statická, transientní, způsob ukládání výsledků atd.) a definuje okrajové či počáteční podmínky. Následuje spuštění solveru (řešiče) a vlastní numerický výpočet (tzv. processing). Poslední etapou řešení numerické simulace je postprocessing, který slouží k vyhodnocení a grafické interpretaci získaných výsledků. Program Ansys disponuje celou řadou účinných nástrojů pro zpracování numerických dat, mezi nejužitečnější patří možnost mapování (interpolace) výsledků podél libovolně nadefinované cesty (přímkové nebo kruhové) skrze geometrii vyřešené úlohy.

4.1.2 APDL - Ansys Parametric Design Language

Program Ansys umožňuje formulovat konečně prvkovou úlohu jednak v přímém dialogu s grafickým rozhraním a jednak prostřednictvím parametrického jazyku APDL. Uživatel má tedy možnost vytvářet své vlastní programové skripty či makra v libovolném textovém editoru. To přináší celou řadu výhod, mezi které patří především možnost využití programových cyklů a možnost snadné modifikace vstupních parametrů řešené úlohy (geometrie, materiálových konstant, fyzikálních veličin, hraničních podmínek atd.). Jazyk APDL tak umožňuje provádět různé optimalizační analýzy a usnadňuje práci

s numerickými daty. Veškeré příkazy jazyku APDL, včetně jejich detailního popisu, jsou uživateli k dispozici v databázi velmi rozsáhlé a propracované nápovědy, jež je nedílnou součástí Ansysu. Psaní programových skriptů navíc značně usnadňuje tzv. Log File, jedná se o textový soubor s příkazy jazyku APDL, který je Ansysem automaticky generován při práci uživatele v grafickém rozhraní.

Vzhledem k výše uvedeným výhodám bylo v jazyce APDL vytvořeno několik programových skriptů, které umožňují efektivní numerický výpočet rozložení magnetického a elektrostatického pole v průřezu řešeného čidla, export získaných dat pro zpracování ve výpočetním prostředí Matlab, a též případnou optimalizaci magnetického obvodu včetně budících cívek. Podrobněji viz přílohy č.4 a č.5.



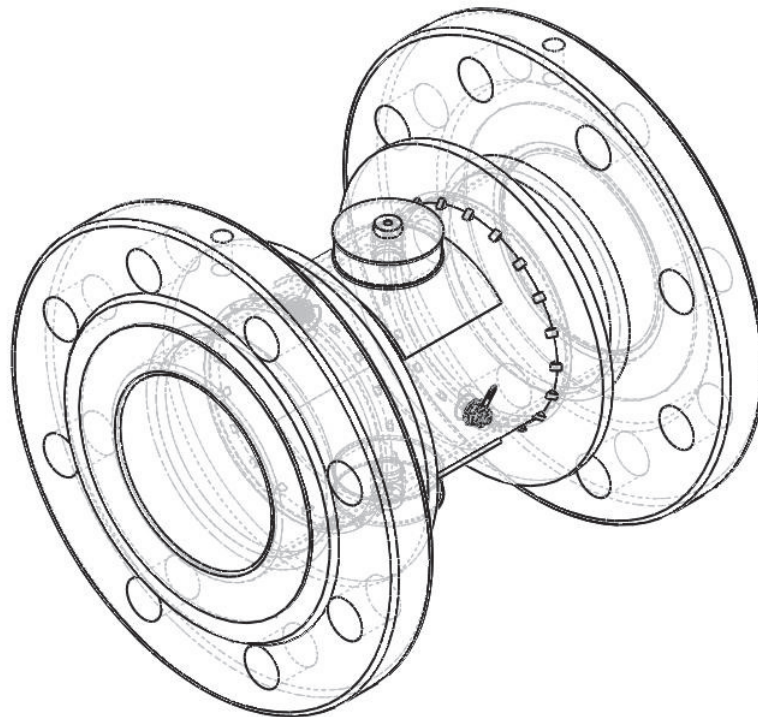
Obr. 4.2 CAD model řešeného čidla indukčního průtokoměru (SolidWorks 2010)

4.2 CAD MODEL ČIDLA INDUKČNÍHO MĚŘIČE PRŮTOKU

V rámci této diplomové práce byla provedena numerická analýza čidla DN80 (průměr průtočného průřezu $D \doteq 80$ mm) s vnitřním magnetickým obvodem a také dvou jeho odlišných konfigurací (viz podkap. 4.7 a 4.8). Základní geometrické rozměry, odvozené z reálného prototypu, poskytl pan Ing. Sedláček, Ph.D. CAD model řešeného čidla (bez stínícího pláště a vnitřního feromag. plechu) vytvořený v programu SolidWorks 2010 je uvedený na Obr. 4.2 a Obr. 4.3. Vlastní čidlo průtokoměru se skládá z dvojice budících cívek válcového tvaru, které vytvářejí potřebné mag. pole, měřicí trubice DN80

(88,9 x 3 mm) z nerezové oceli opatřené el. nevodivou výstelkou, dále z vnitřního magnetického obvodu, stínění a z dvojice knoflíkových snímacích elektrod. K měřicí trubici jsou též přivařeny příruby DN80 (EN 1092-1) pro připevnění průtokoměru k potrubí.

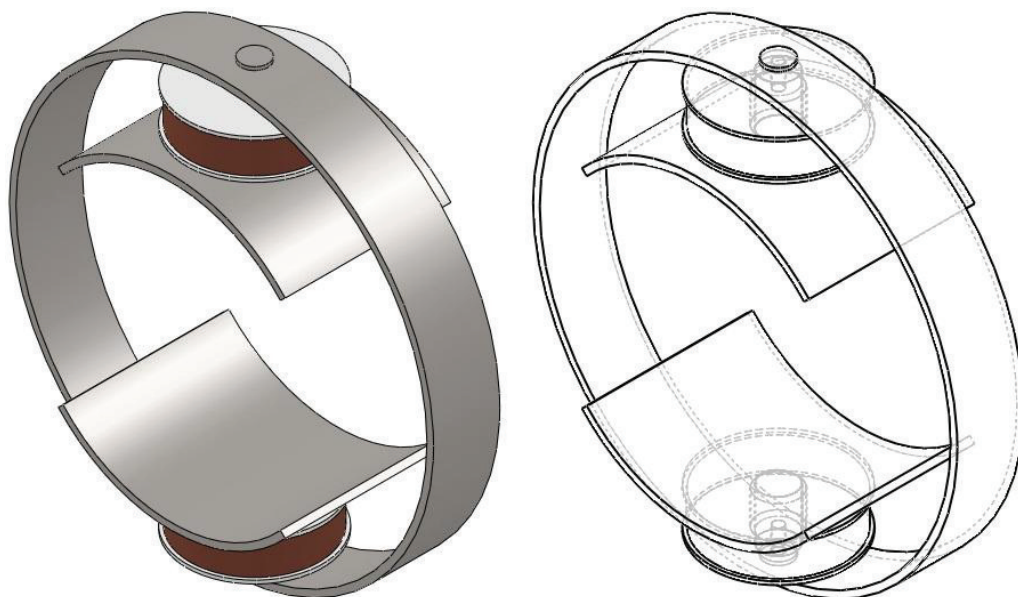
Vnitřní magnetický obvod (Obr. 4.4) je složen z dvojice pólových nástavců opatřených jádry, na nichž jsou umístěné budicí cívky, a z pláště (plechu) tloušťky 2,5 mm, přes který se uzavírá vybuzené magnetické pole. Vnitřní magnetický obvod musí mít co nejmenší reluktanci (magnetický odpor), a je tedy vyrobený z feromagnetické uhlíkové konstrukční oceli (ČSN 11 373). Celé čidlo navíc obklopuje z důvodu elektromagnetické kompatibility feromagnetické stínění ze stejného materiálu. Stínění tvoří dvojice prstencových čel (navářených na měřicí trubici) a stínící plášť. Technické výkresy a CAD modely řešeného čidla indukčního průtokoměru, včetně jednotlivých prvků, jsou součástí příloh k diplomové práci (konkrétně příloh č.10 až č.14).



Obr. 4.3 CAD model řešeného čidla indukčního průtokoměru - zobrazení skrytých hran (SolidWorks 2010)

Rozměry vnitřního mag. obvodu čidla vycházejí z vnitřního průměru válcových budicích cívek, který byl zvolen 14 mm. Mezi cívkou a jádrem byla uvažována mezera o velikosti 2 mm, mezi cívkou a pólovým nástavcem pak mezera 1 mm. Mezery slouží jako vůle pro případ montáže cívek navinutých na kostrách, při použití samonosných cívek by bylo možné vůle redukovat např. na 0,5 mm. S ohledem na rovnoměrné využití mag. obvodu, byly na základě kruhového průřezu jádra (průměr 10 mm) dopočteny potřebné tloušťky pólových nástavců a vnitřního feromagnetického pláště (plechu).

Šířka pólových nástavců byla přizpůsobena vnitřnímu prostoru čidla tak, aby se nástavce příliš nepřiblížily čelům pláště (z důvodu magnetického zkratu) a zároveň byly co nejširší z hlediska "protlačení" maximální velikosti mag. toku skrze vnitřní objem měřicí trubice. Možnému magnetickému zkratu, tj. uzavírání části mag. toku mimo oblast měření, je nutné věnovat pozornost i při volbě úhlové rozteče pólových nástavců. Příliš velká rozteč vede ke stejnému efektu, jako v případě použití měřicí trubice z feromagnetického materiálu. Ve výchozím geometrickém modelu čidla byla zvolena rozteč 95°.



Obr. 4.4 Vnitřní magnetický obvod řešeného čidla indukčního průtokoměru (SolidWorks 2010)

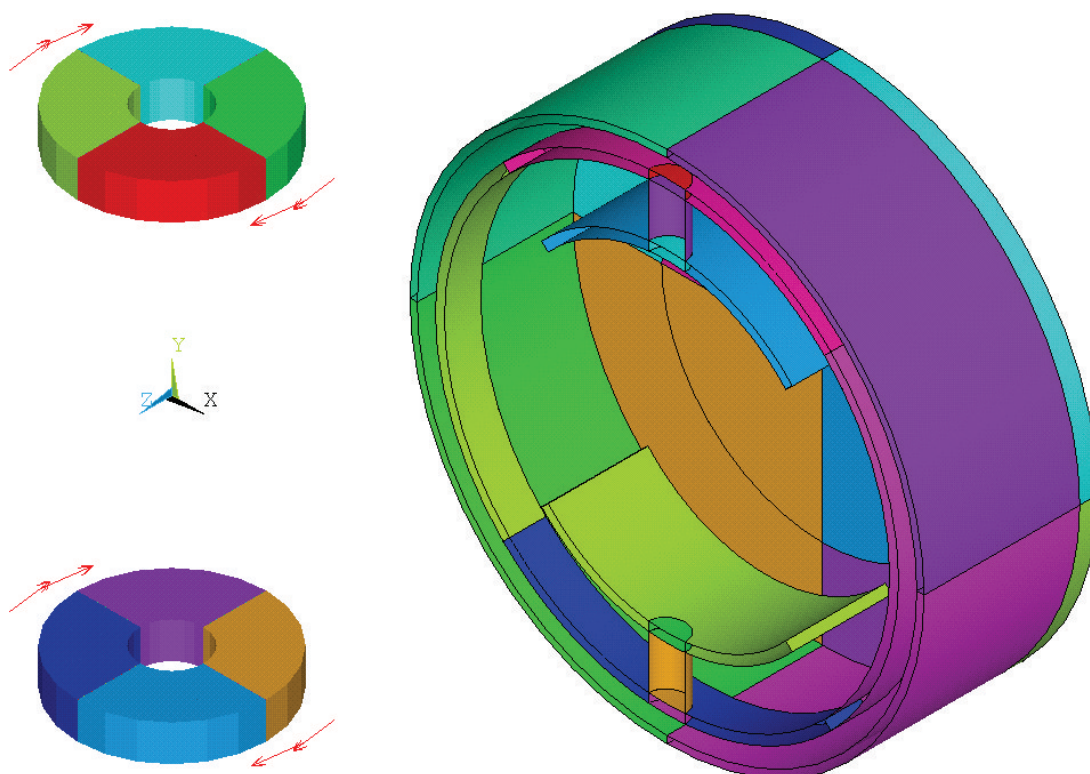
4.3 GEOMETRIE NUMERICKÉHO MODELU ČIDLA V PROGRAMU ANSYS

Z hlediska numerické analýzy v programu Ansys není nutné provádět výpočet rozložení magnetického pole v úplném CAD modelu čidla (Obr. 4.2). Je vhodné s ohledem na tvorbu sítě a s ohledem na náročnost a dobu trvání výpočtů využít co nejvíce zjednodušené geometrie numerického modelu. Také je nutné brát v úvahu omezené možnosti tvorby komplexních geometrických tvarů při práci v rozhraní Ansys Classic.

V geometrii numerického modelu tedy nejsou zahrnuty snímací elektrody, měřicí trubice, její výstelka a eventuelní kostry cívek, neboť se jedná o nemagnetické materiály s $\mu_r = 1$. Z numerického modelu bylo též možné vypustit obě ocelové příruby, které jsou od magnetického pole čidla odstíněné feromagnetickými prstencovými čely a pláštěm. Příruby mají tedy na výsledné rozložení mag. pole zanedbatelný vliv, jejich přítomnost v modelu by vedla jen ke zvýšeným výpočetním nárokům numerické simulace. Čidlo sice

vykazuje osovou souměrnost ve všech základních rovinách, avšak nelze jí využít pro zjednodušení geometrie numerického modelu. Vybuzené mag. pole se v rovinách symetrie uzavírá různými směry, a proto není možné zformulovat podmínky na rozhraní.

Definiční oblast numerického modelu je naopak oproti CAD verzi rozšířená o okolní prostředí (vzduch s $\mu_r = 1$), které vymezuje válcová hraniční oblast a geometrie čidla indukčního průtokoměru. Okolní prostředí umožňuje určit, do jaké míry se mag. pole uzavírá mimo stínění, což je důležité pro vyhodnocení jeho účinnosti resp. elektromagnetické kompatibility čidla a též pro vyhodnocení efektivity návrhu vnitřního mag. obvodu.



Obr. 4.5 Pohled na budící cívky (element SOURC 36) a geometrii numerického modelu čidla (rovina řezu xy)

Výsledná geometrie čidla vytvořená v programu Ansys pro účely numerické analýzy je na Obr. 4.5. Geometrie jednotlivých částí byla koncipována tak, aby bylo možné v co největší míře využít pro jejich diskretizaci mapovanou konečně prvkovou síť (z angl. mapped mesh) nebo síť vygenerovanou pomocí funkce "sweep". Tato funkce programu Ansys umožňuje rychlou tvorbu pravidelné trojrozměrné sítě v příslušném objemu čidla promítnutím 2D sítě ze zdrojové plochy (tzv. source area) na plochu protější (tzv. target area). Pro síťování ploch za účelem "sweepování" má Ansys k dispozici speciální element MESH 200. Mapované a "sweepované" 3D sítě mají obecně menší hustotu než sítě volné (free mesh), neboť jsou tvořeny šestistěnnými elementy. Mezi hlavní výhody těchto sítí

patří především možnost snadného řízení počtu elementů v geometrickém modelu, jejich rychlé generování a též kratší doba trvání numerického výpočtu.

4.4 NUMERICKÝ A MATEMATICKÝ MODEL ČIDLA V PROGRAMU ANSYS

Vzhledem k tomu, že indukované napětí se snímá z elektrod v okamžiku, kdy je vybuzené magnetické pole v ustáleném stavu, jedná se z hlediska numerické analýzy o trojdimenzionální stacionární úlohu (nedochází k časovým změnám). Maxwellovy rovnice, popisující obecné stacionární magnetické pole, lze matematicky vyjádřit ve tvaru

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}_S \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= \text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H})\end{aligned}\tag{4.1}$$

kde \mathbf{H} [$A \cdot m^{-1}$] je vektorová funkce mag. intenzity, \mathbf{J}_S [$A \cdot m^{-2}$] proudové hustoty a \mathbf{B} [T] mag. indukce, μ [$H \cdot m^{-1}$] představuje permeabilitu prostředí. Program Ansys umožňuje řešit tyto rovnice pomocí magnetického vektorového potenciálu (např. elementy SOLID 236 a 237), anebo prostřednictvím metody magnetického skalárního potenciálu (elementy SOLID 5, 96 a 98).

Pro numerickou analýzu řešeného čidla indukčního průtokoměru byla zvolena metoda mag. skalárního potenciálu, její výhodou je menší výpočetní náročnost a též možnost modelování budících cívek a jiných proudovodičů pomocí elementu SOURC 36 a předdefinovaného makra RACE. Jako výchozí element byl použit osmi uzlový SOLID 96. Obecné rovnice pro mag. skalární potenciál odvozené na základě rovnic (4.1) mají tvar

$$\begin{aligned}\mathbf{H} &= \mathbf{H}_g + \nabla \varphi_g = \mathbf{H}_g + \text{grad } \varphi_g \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= \nabla \cdot (\mu \cdot \mathbf{H}) = 0 \rightarrow \text{div } \mu \cdot (\mathbf{H}_g + \text{grad } \varphi_g) = 0\end{aligned}\tag{4.2}$$

kde \mathbf{H}_g [$A \cdot m^{-1}$] je vektorová funkce "předběžně" určené mag. intenzity (preliminary magnetic field) a φ_g [A] zobecněný magnetický skalární potenciál. V případě čidla indukčního průtokoměru ($\mathbf{J}_S \neq 0$, $\mu \neq \mu_0$) je magnetické pole řešeno sekvenčně tzv. DSP metodou (Differential Scalar Potential). V první fázi numerické analýzy se počítá přibližné rozložení magnetického pole (air-only solution), permeabilita feromagnetických částí je programem nastavena na velmi vysokou hodnotu ($\mu \rightarrow \infty$). V rovnicích (4.2) se provede

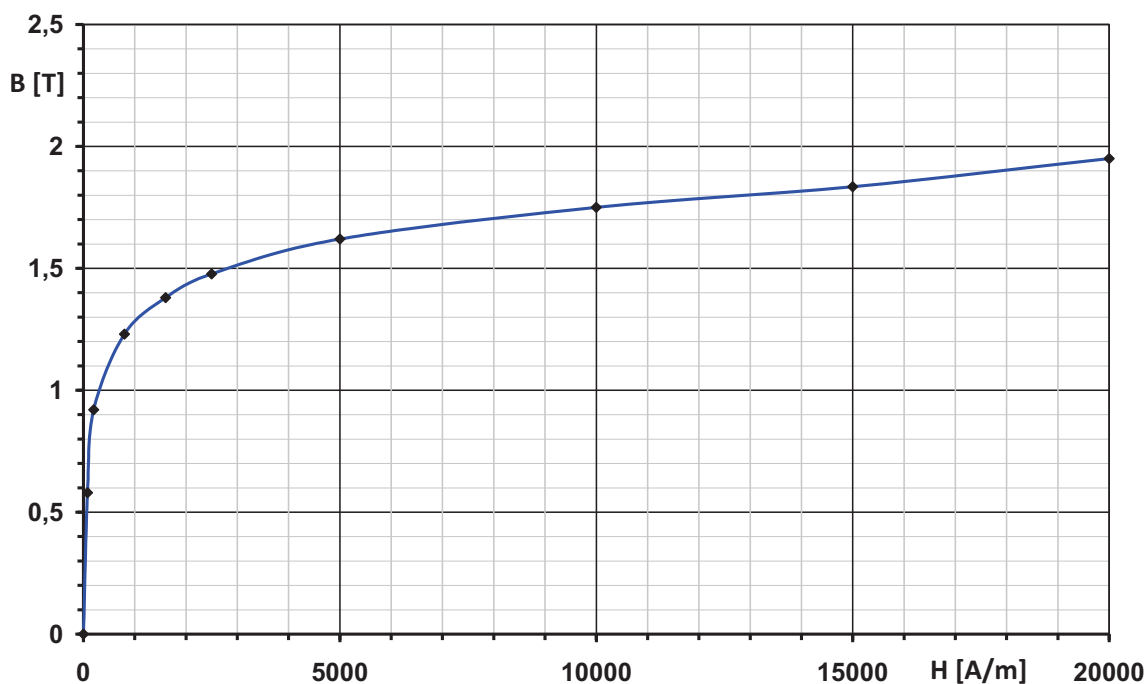
substituce $\mathbf{H}_G = \mathbf{H}_{BS}$. Mag. intenzita \mathbf{H}_{BS} v libovolném místě definiční oblasti Ω se určí z výpočtu Biot-Savartova integrálu (viz např. [11] str. 113), který je funkcí proudové hustoty

$$\mathbf{H}_{BS}(P) = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}_S(Q) \times \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} dV_Q \quad (4.3)$$

kde $V [m^3]$ je objem proudovodiče, tj. budících cívek, $\mathbf{J}_S(Q) [A \cdot m^{-2}]$ proudová hustota v bodě Q resp. v elementárním objemu dV_Q a $\mathbf{r} [m]$ radiusvektor vymezený bodem Q a bodem P , ve kterém je prováděna evaluace mag. pole. Hodnoty proudové hustoty jsou do uzlů konečně prvkové sítě dodány prostřednictvím virtuálního elementu SOURC 36. Válcové budící cívky vytvořené tímto elementem ilustruje Obr. 4.5, sedlové cívky pak Obr. 4.27, viz podkap. 4.8. Pro podoblasti s feromagnetiky ($\mu \neq \mu_0, \Omega_1$) a pro podoblasti s nemagnetickými materiály (μ_0, Ω_0) po vyřešení Laplaceovy rovnice pro φ_g potom platí

$$\Omega_1: \mathbf{H}_1 = 0 \quad \Omega_0: \mathbf{H}_0 = \mathbf{H}_{BS} + \nabla\varphi_g \quad (4.4)$$

Po skončení první fáze výpočtu následuje druhý krok, ve kterém program Ansys zohlední magnetické sycení feromagnetických částí. Jak již bylo zmíněno, vnitřní magnetický obvod a stínící plášť čidla tvoří běžná konstrukční ocel ČSN 11 373. Její magnetizační křivka, charakterizující nelineární závislost mezi mag. indukci B a intenzitou H , je na Obr. 4.6.

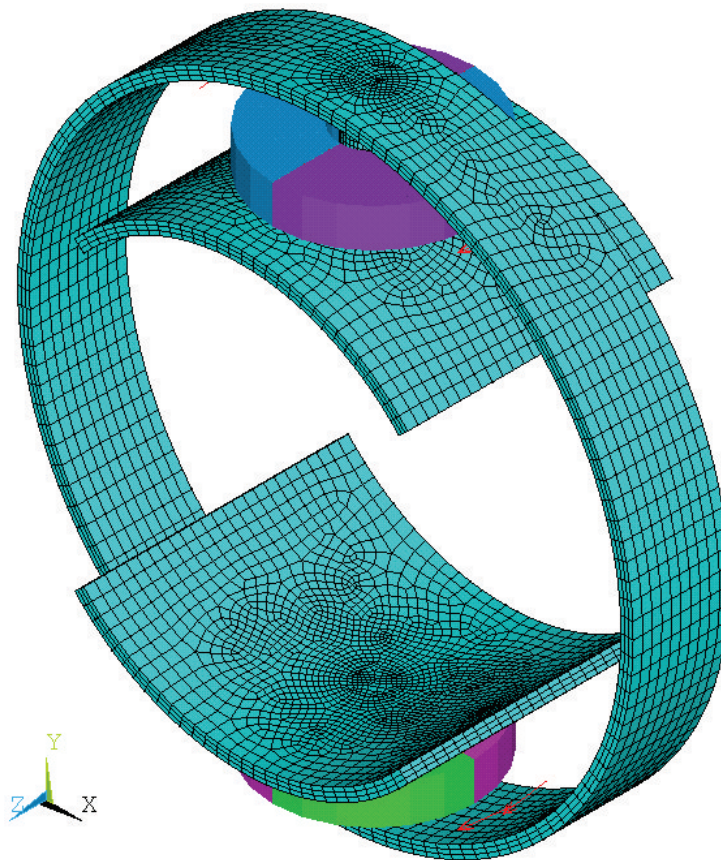


Obr. 4.6 Magnetizační křivka konstrukční uhlíkové oceli ČSN 11 373 - $B = B(H)$

Finální rozložení magnetického pole v definiční oblasti Ω je programem Ansys dopočítáno na základě výsledků z předchozí fáze DSP metody

$$\begin{aligned}\Omega_1: \mathbf{H}_g = \mathbf{H}_1 \rightarrow \operatorname{div} \mu \cdot (\operatorname{grad} \varphi_g) &= 0 \rightarrow \mathbf{H}_{1f} = \nabla \varphi_g \\ \Omega_0: \mathbf{H}_g = \mathbf{H}_0 \rightarrow \operatorname{div} \mu_0 \cdot (\mathbf{H}_0 + \nabla \varphi_g) &= 0 \rightarrow \\ \rightarrow \mathbf{H}_{0f} = \mathbf{H}_G + \nabla \varphi_g\end{aligned}\quad (4.5)$$

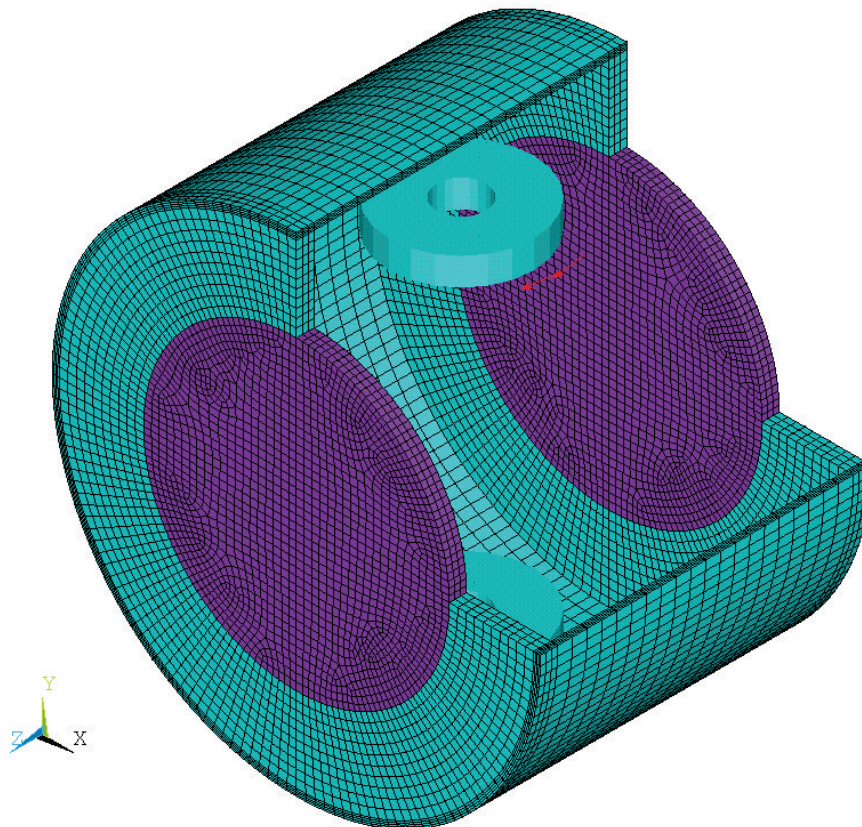
Detailněji o teorii magnetického skalárního potenciálu a o jeho využití při MKP analýzách pojednává článek [5], jehož autory jsou M. Gyimesi a J. D. Lavers.



Obr. 4.7 Pohled na síť vnitřního magnetického obvodu - mapovaná a "sweepovaná" síť - šestistěnné elementy

Numerická analýza stacionárního magnetického pole řešeného čidla indukčního průtokoměru byla provedena pro konečně prvkovou síť o 330 594 uzlech a 1 692 723 elementech, při budícím proudu obou cívek o hodnotě 100 A a nulovou Dirichletovou okrajovou podmínkou pro mag. skalární potenciál, která byla nastavena do uzlů na povrchu válcové hraniční oblasti. Hustota sítě byla zvolena s ohledem na maximální využití hardwaru PC (základní deska Gigabyte Z68A-D3H-B3, procesor Intel Quad Core i5-2500K, 3,3 GHz, operační paměti Kingston 8 GB, DDR3, 1600 MHz, grafická karta Gigabyte GTX560 OC, 64-bit. operační systém Windows 7 Professional).

Obr. 4.7 ilustruje konečně prvkovou síť vnitřního magnetického obvodu (včetně budících cívek - element SOURC 36), Obr. 4.8 pak síť feromagnetického stínění. Pro tyto části čidla indukčního průtokoměru byla použita mapovaná a "sweepovaná" síť, tj. šestistěnné elementy SOLID 96. Pouze vnitřní objem čidla a válcová hraniční oblast jsou ve vytvořeném numerickém modelu diskretizovány čtyřstěny, tj. volnou sítí (free mesh), neboť u těchto podoblastí nebylo možné z důvodu jejich geometrického uspořádání vytvořit síť pravidelnou.



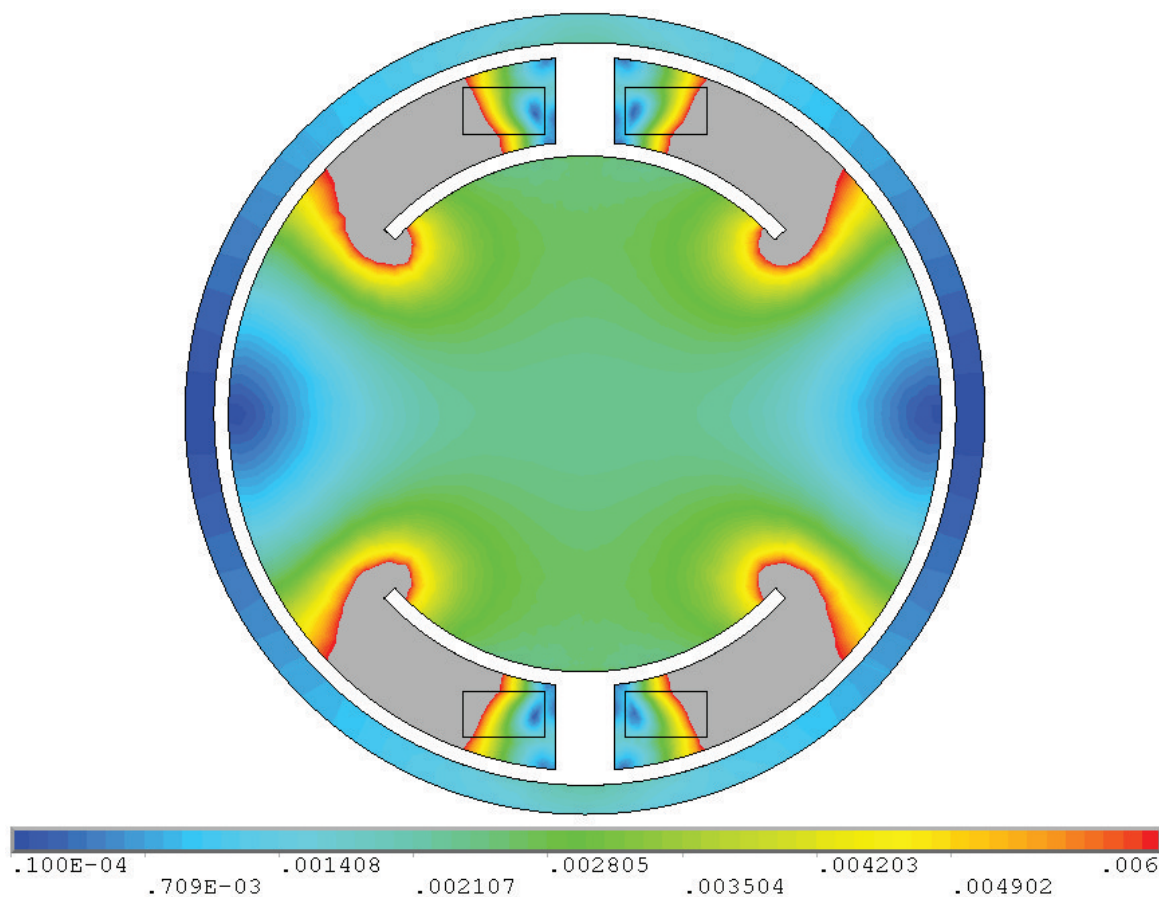
Obr. 4.8 Pohled na síť feromagnetického stínění - mapovaná a "sweepovaná" síť - šestistěnné elementy

Získané výsledky numerické analýzy stacionárního mag. pole čidla byly zpracovány jednak nástroji, kterými disponuje program Ansys, a po exportu numerických dat do textového souboru též nástroji výpočetního prostředí Matlab 7.1. Díky spolupráci těchto programů bylo možné určit velikost indukovaného napětí na snímacích elektrodách pro danou konfiguraci čidla a pro zvolený rychlostní profil kapaliny. V rámci 4. bodu zadání této diplomové práce byly analyzovány dvě různé metody výpočtu indukovaného napětí. První metoda vychází z teorie tzv. váhových funkcí čidla a druhá z numerického řešení parciální diferenciální rovnice pro rozložení potenciálu v průřezu měřicí trubice. Problematika těchto metod, použité postupy řešení a obdržené výsledky jsou přehledně shrnuty v 5. kapitole, str. 87 až str. 105.

4.5 VÝSLEDKY NUMERICKÉ ANALÝZY STACIONÁRNÍHO MAGNETICKÉHO POLE ČIDLA INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU

4.5.1 Vyhodnocení rozložení stacionárního magnetického pole v čidle DN80

Základní představu o rozložení vybuzeného magnetického pole v rovině snímacích elektrod udávají Obr. 4.9 a Obr. 4.10. Jak již bylo uvedeno v teoretické části práce, konfigurace budících cívek a magnetického obvodu by měla v oblasti měření zajistit magnetické pole kolmé na směr proudění kapaliny s co největší hodnotou mag. indukce B . Jak ukazuje teorie váhových funkcí indukčních průtokoměrů, není nezbytně nutné, aby bylo vybuzené mag. pole homogenní v celém prostoru měřicí trubice. Vhodným rozložením mag. pole lze docílit snížení citlivosti čidla např. na asymetrické rychlostní profily (podrobněji viz kapitola 5).

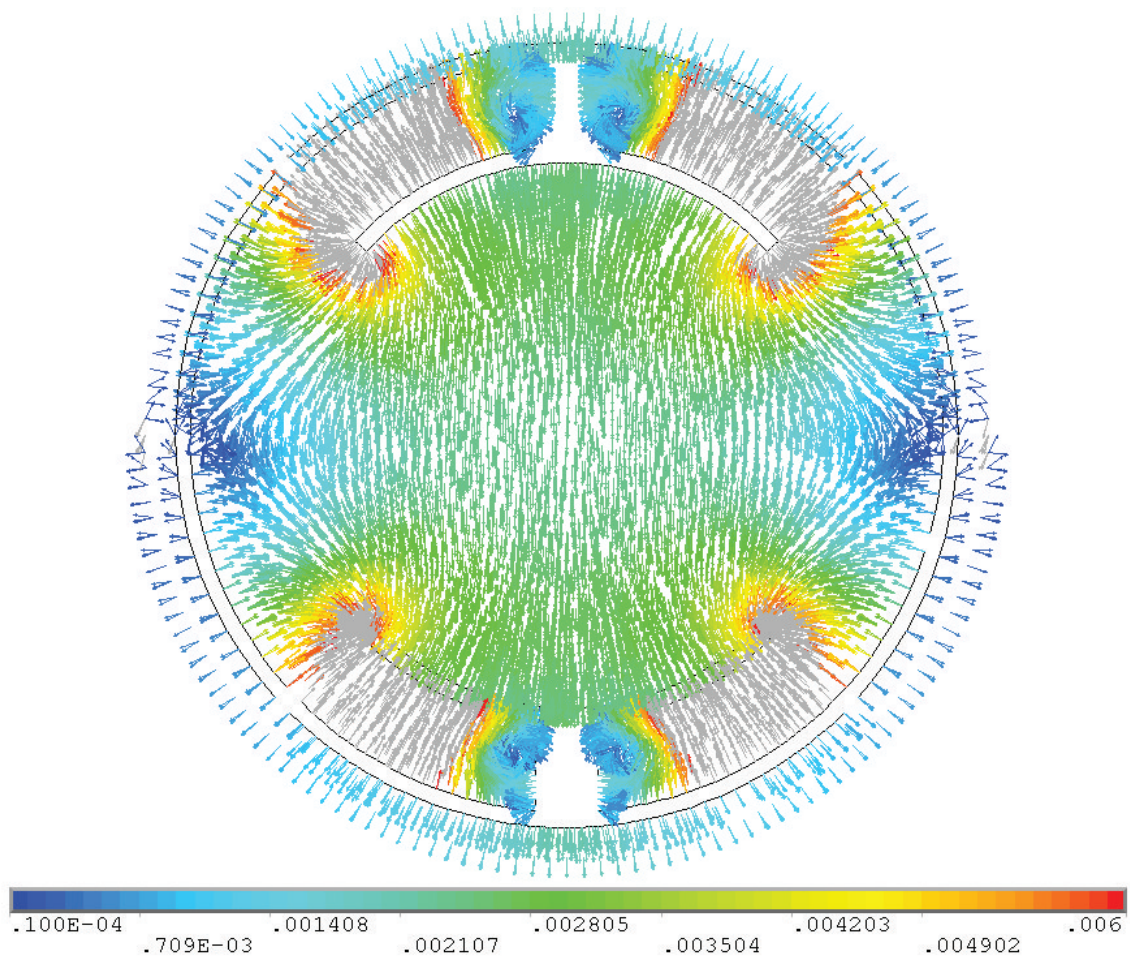


Obr. 4.9 Rozložení mag. indukce B [T] ve vnitřním objemu čidla - rovina řezu xy , $z = 0$

Z Obr. 4.9 resp. z Obr. 4.10 je zřejmé, že se značná část magnetického toku budících cívek uzavírá mimo oblast měřicí trubice. Jedná se o logický důsledek velké reluktance (mag. odporu) prostoru mezi pólovými nástavci ($\mu_r = 1$). Ke značnému rozptýlu mag. pole dochází mezi vnitřním pláštěm a plechy pólových nástavců, neboť se

mezi nimi nachází poměrně úzká vzduchová mezera. To potvrzuje i Obr. 4.17, na kterém je jasně patrné větší sycení ve vrchní části pláště. Z tohoto důvodu byla provedena též numerická analýza varianty čidla s vnějším magnetickým obvodem (viz podkap. 4.7).

Rozložení magnetického pole v průtočném průřezu čidla je rovnoměrné, s dominantní y-ovou složkou. Pouze na okrajích pólových nástavců, kde dochází k již zmíněným magnetickým zkratům na vnitřní feromagnetický plášť, je vybuzené mag. pole značně nehomogenní a s větší intenzitou. V těchto místech má významný vliv i x-ová složka mag. indukce. Z-ovou složku bylo možné pro další 2D numerické výpočty zcela vyloučit, protože její hodnoty vyšly v porovnání se složkami x a y až o několik řádů menší. Střední hodnota celkové mag. indukce v průtočném průřezu dosáhla hodnoty $2,58 \text{ mT}$ (střední hodnoty složek: $B_{xavg} = 0,21 \text{ mT}$, $B_{yavg} = 2,55 \text{ mT}$). Prostorové rozložení mag. pole (včetně složek B_x a B_y) znázorňují grafy v příloze č.1.

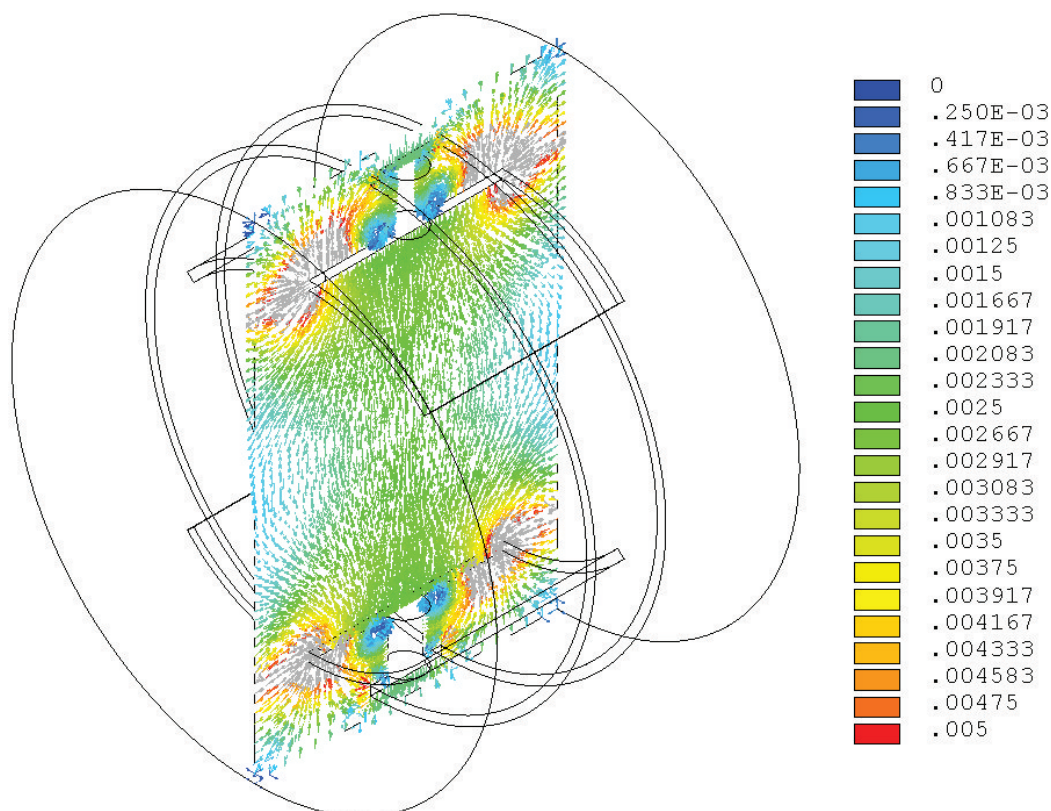


Obr. 4.10 Rozložení vektorů mag. indukce B [T] ve vnitřním objemu čidla - rovina řezu xy, z = 0

Obr. 4.10 dobře ilustruje chování pole na rozhraní feromagnetikum - vzduch, vektory mag. indukce jsou díky velkému rozdílu permeabilit ($\mu_{ocel} \gg \mu_0$) prakticky kolmé na rozhraní.

Určitá část vybuzeného mag. pole se samozřejmě uzavírá též feromagnetickým stíněním. Z Obr. 4.19 a Obr. 4.20 je dobře patrné větší sycení prstencových čel v místech s nejnižší reluktancí, kudy se uzavírá rozptylový tok pólových nástavců. Ve vrchní a spodní čtvrtině stínícího pláště se naopak nacházejí slabě sycené plochy, které jsou částečně odstíněny vnitřním magnetickým obvodem.

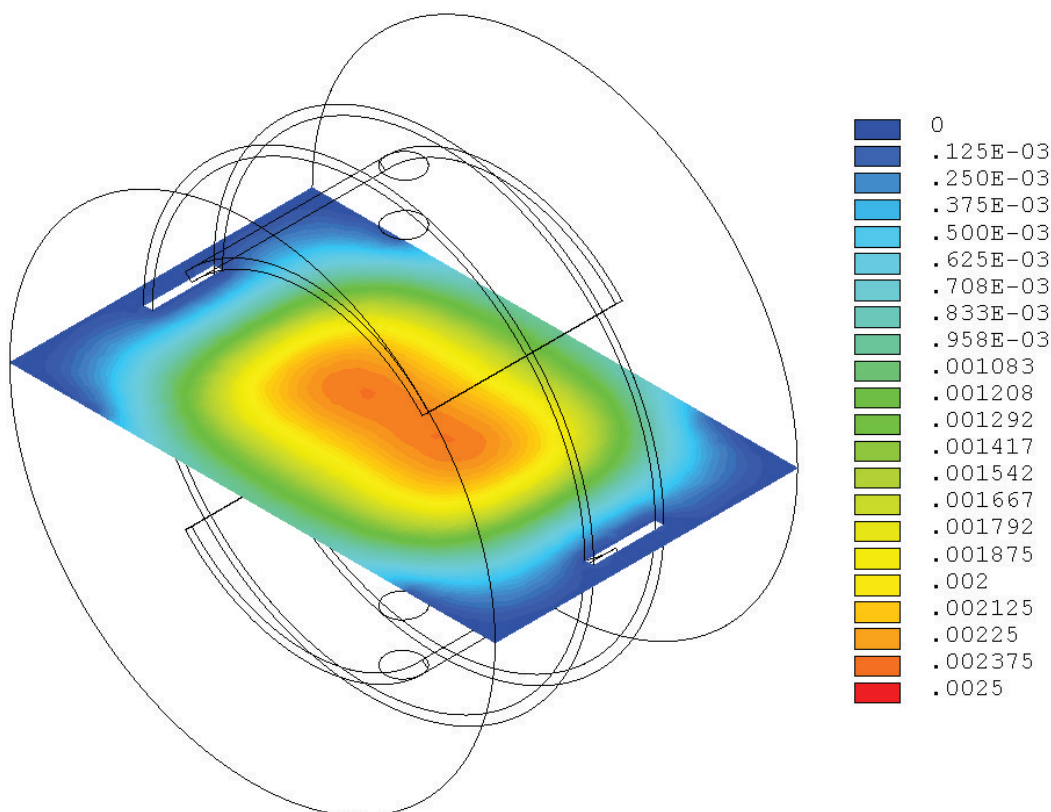
Mezi čidlem průtokoměru a jeho bezprostředním okolím by v ustáleném stavu nemělo docházet k významnější elektromagnetické interakci. Na povrchu stínění vyšla maximální hodnota mag. indukce $1,8 \text{ mT}$, na povrchu válcové hraniční oblasti o poloměru $2 \cdot R_{\text{čidla}}$ pak $26 \mu\text{T}$. Stínění tedy plní svoji funkci velmi dobře, vybuzené mag. pole vně čidla je slabé. Z hlediska EMC by bylo nutné provést měření mag. pole především během přechodové fáze, tj. během nabuzování cívek, kdy vznikají kmity vlivem jejich indukčností a parazitních kapacit. V rámci měření EMC by měla být odzkoušena též účinnost stínění z hlediska ochrany čidla před cizími rušivými mag. poli.



Obr. 4.11 Rozložení vektorů mag. indukce B [T] ve vnitřním objemu čidla - rovina řezu yz , $x = 0$

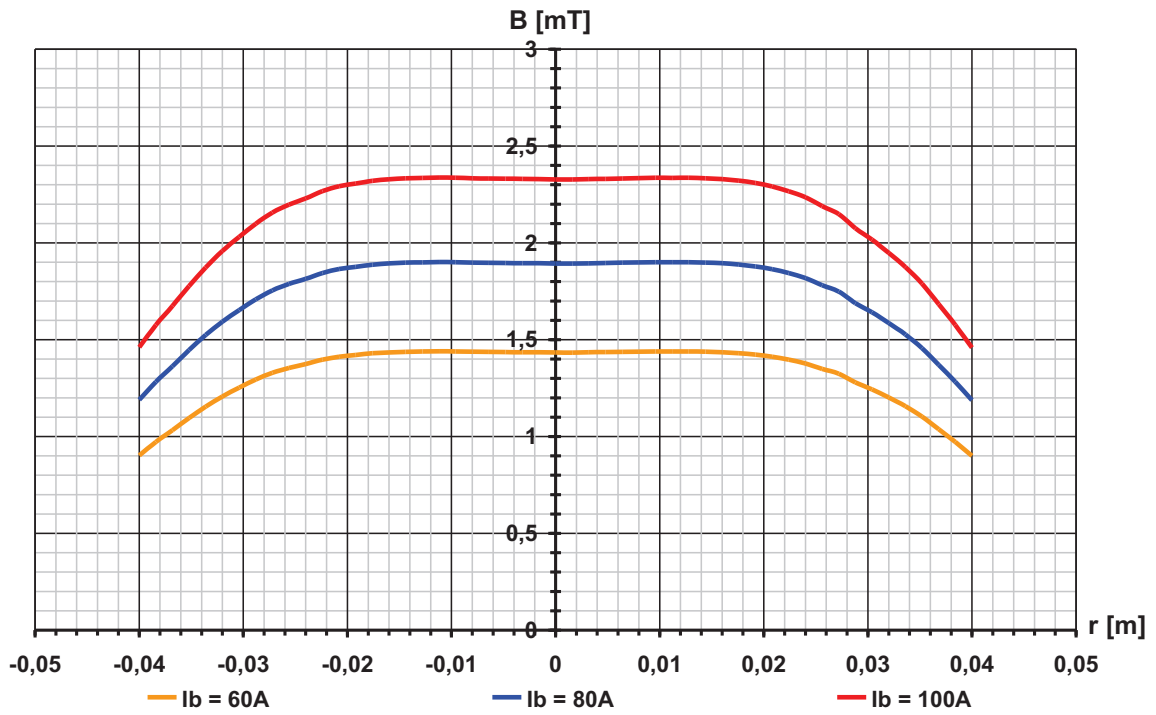
Budící proud o velikosti 100 A nezpůsobuje výraznější přesycování feromagnetik, ve většině vnitřního mag. obvodu dosahuje mag. indukce hodnot lineární oblasti křivky prvotní magnetizace (Obr. 4.17 a Obr. 4.18). Mag. tok spřažený s obdélníkovou plochou (určenou průměrem trubice a šířkou pólových nástavců) v rovině xz ($y = 0$) vyšel

8,5 μWb , mag. tok přes průřez jádra cívky pak 66 μWb . Značný rozdíl těchto hodnot opět poukazuje na rozptylové toky v oblasti pólových nástavců a vnitřního pláště. Tyto rozptylové toky jsou nedílnou součástí prostorového uspořádání čidla a nelze je významně omezit. Reluktance rozptylových cest by musela být větší než reluktance oblastí mezi pólovými nástavci, toho by bylo možné docílit pouze pomocí značně rozměrného mag. obvodu, což je z hlediska praktické konstrukce čidla nerealizovatelné.



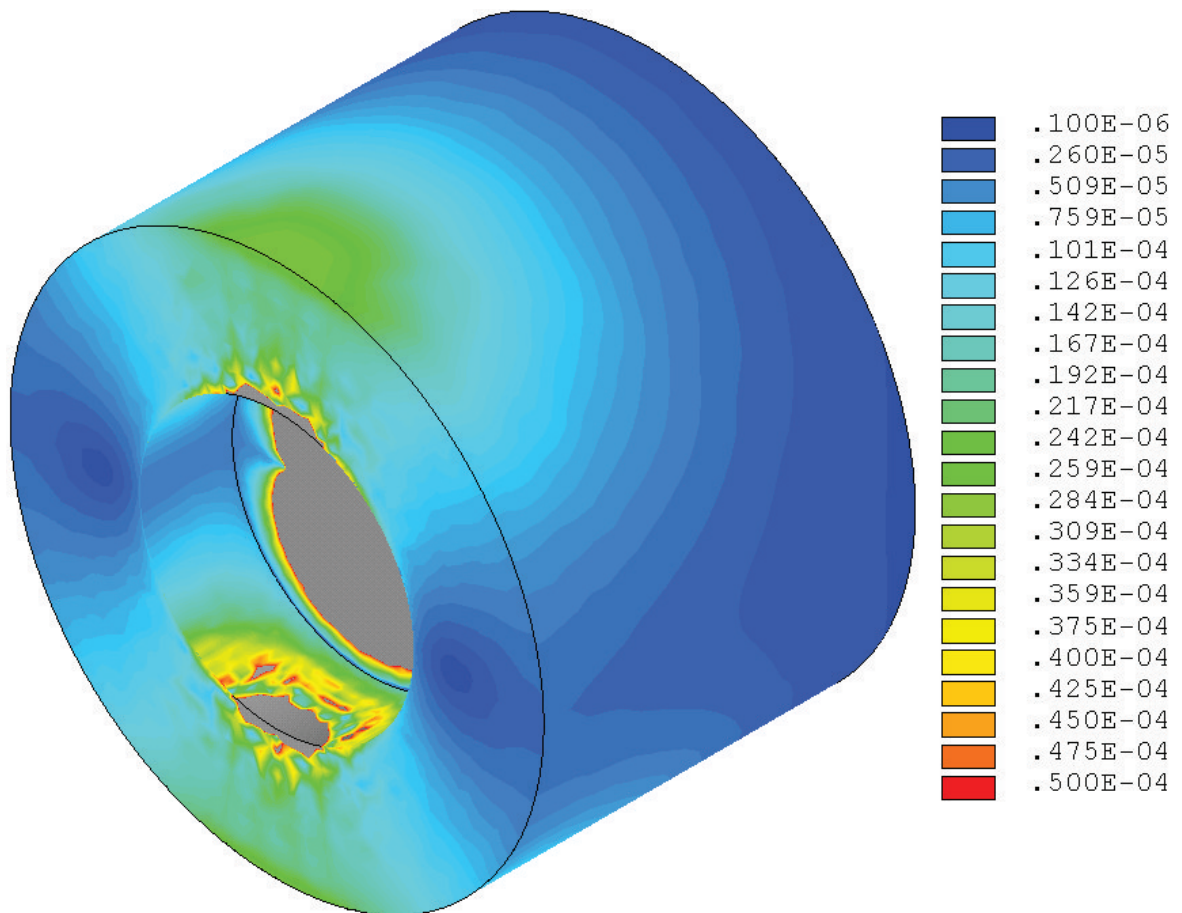
Obr. 4.12 Rozložení mag. indukce B [T] ve vnitřním objemu čidla - rovina řezu xz , $y = 0$

Jako hlavní kritérium pro vyhodnocení funkce magnetického obvodu čidla byla zvolena velikost mag. indukce na spojnici mezi elektrodami. Její rozložení pro buzení proudem 60, 80 a 100 A ilustruje graf na Obr. 4.13. Mag. pole vykazuje na spojnici pouze y -ovou složku, velikost x -ové složky lze pro její malé hodnoty zanedbat ($B_{x_{max}} = 12 \mu T$ x $B_{y_{min}} = 1,46 mT$). Maximální hodnota vyšla 2,34 mT , minimální 1,46 mT a střední hodnota pak 2,14 mT . Rozdíl mezi maximem a minimem činí tedy 0,88 mT . Za předpokladu bodových elektrod a střední rychlosti proudění kapaliny $1 m \cdot s^{-1}$ by indukované napětí podle vzorce (3.1) dosáhlo velikosti 0,171 mV . Pokles mag. indukce v oblasti elektrod je opět dán konstrukcí čidla, nelze úpravami mag. obvodu docílit zcela konstantního průběhu. Avšak jak ukazuje teorie váhových funkcí (kap. č.5), tento atribut čidla je kompenzován jeho zvýšenou citlivostí právě v blízkosti elektrodového systému.

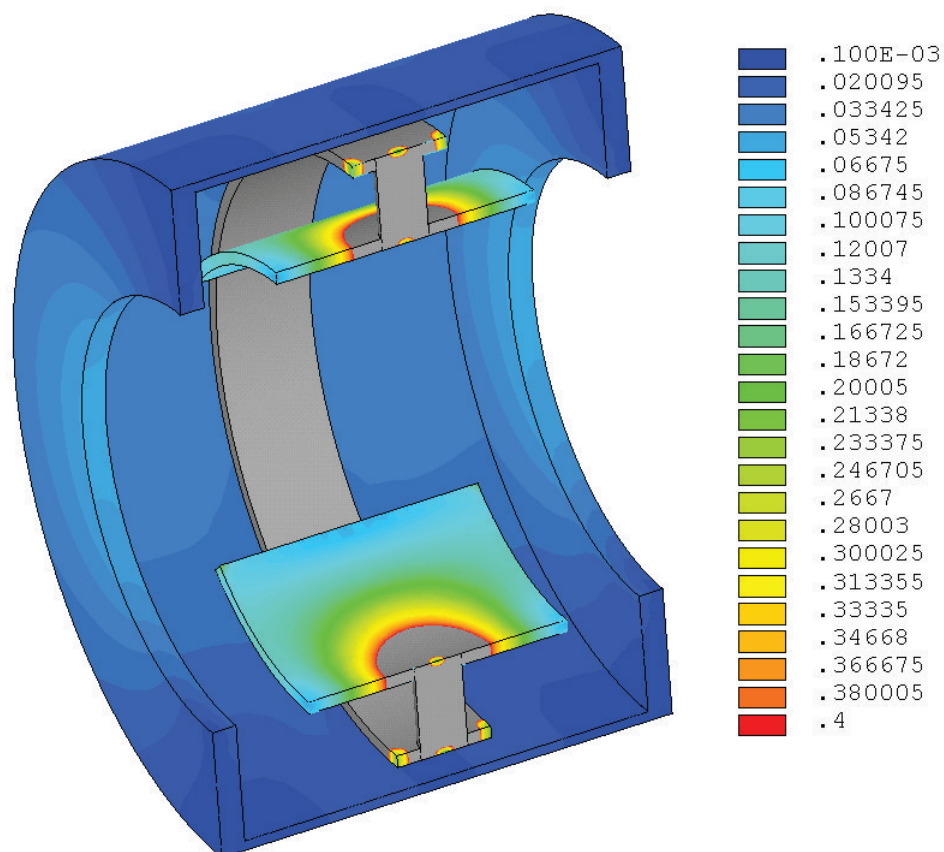
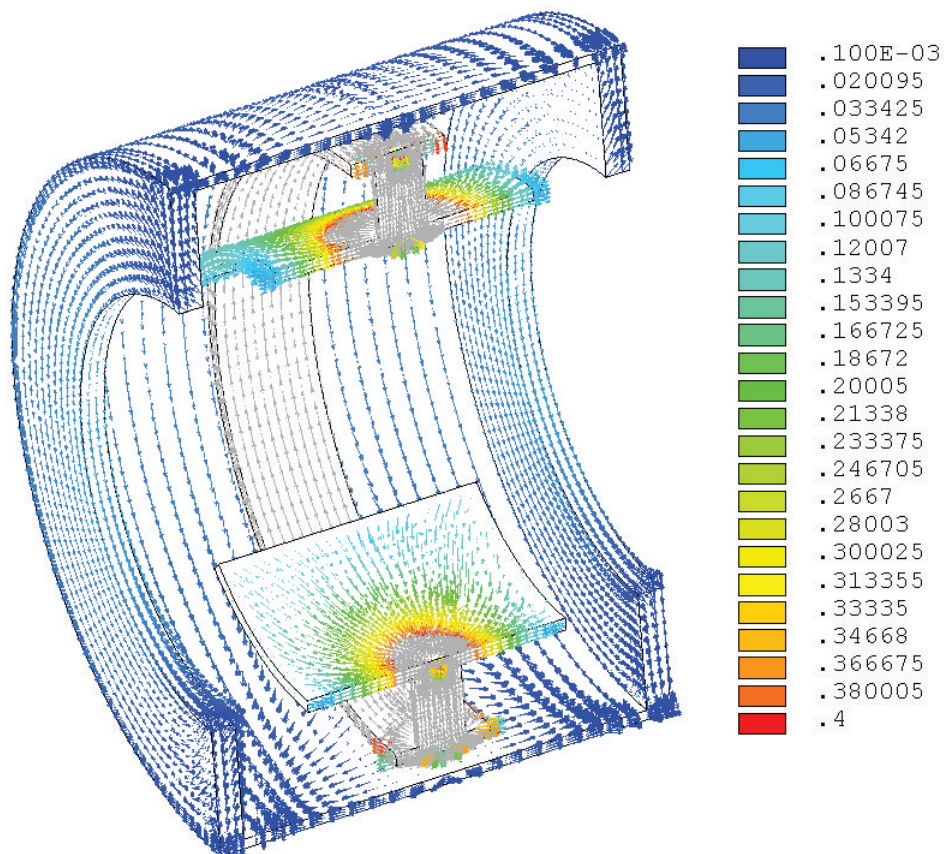


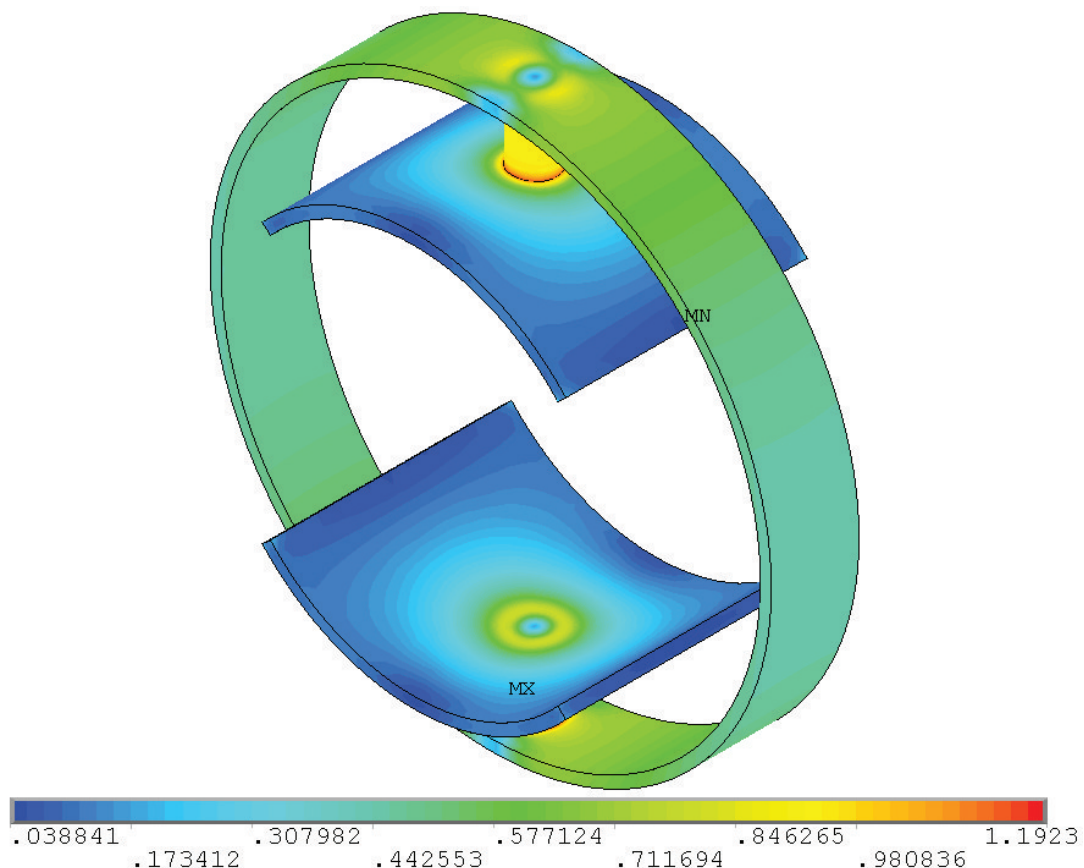
Obr. 4.13 Rozložení mag. indukce B [mT] na spojnici mezi elektrodami - $B = fce(r)$

4.5.2 Prostorové rozložení stacionárního magnetického pole v čidle DN80

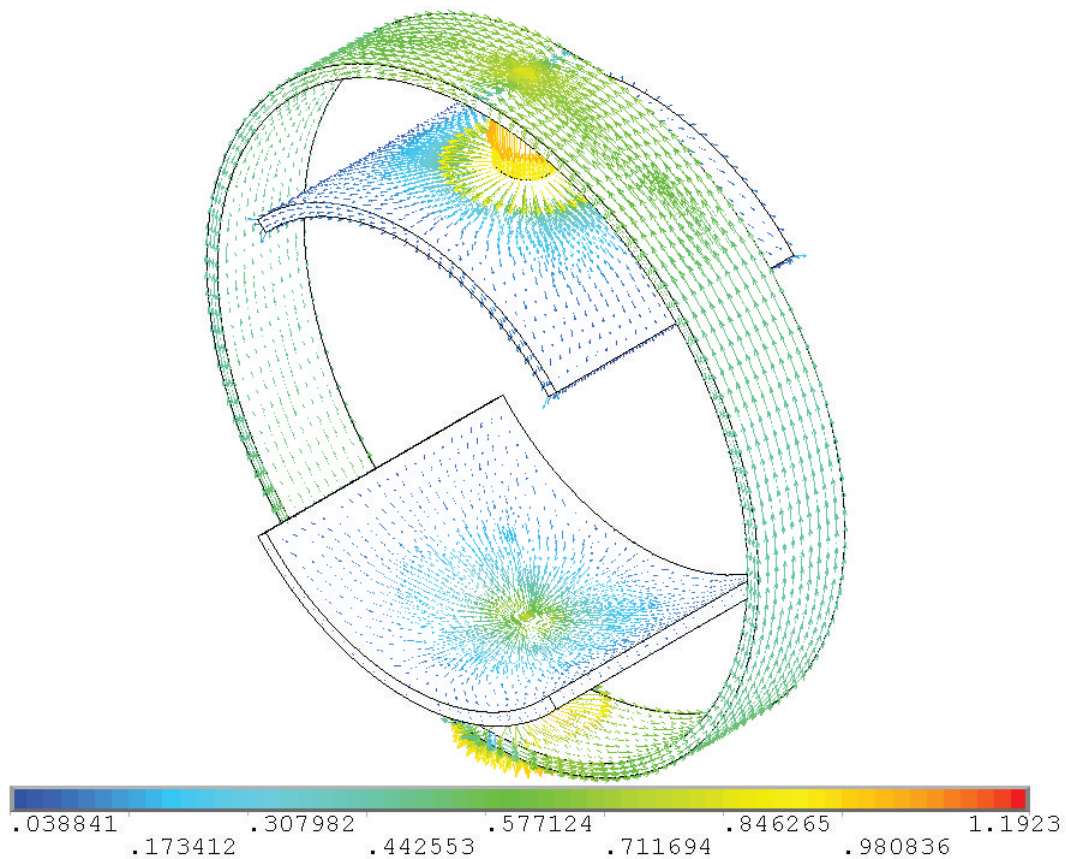


Obr. 4.14 Rozložení mag. indukce B [T] v objemu hraniční oblasti čidla - rovina řezu $xy, z = 0$

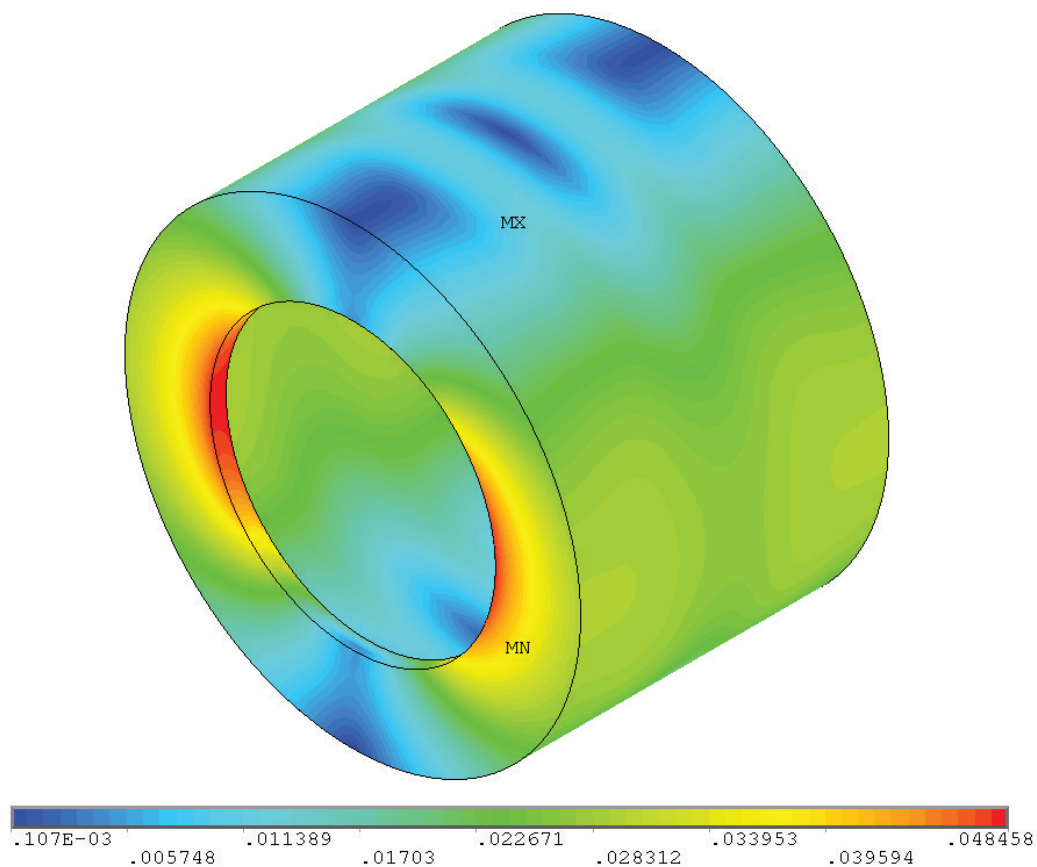
Obr. 4.15 Rozložení mag. indukce B [T] ve vnitřním mag. obvodu a stínění - rovina řezu yz , $x = 0$ Obr. 4.16 Rozložení vektorů mag. indukce B [T] ve vnitřním mag. obvodu a stínění - rovina řezu yz , $x = 0$



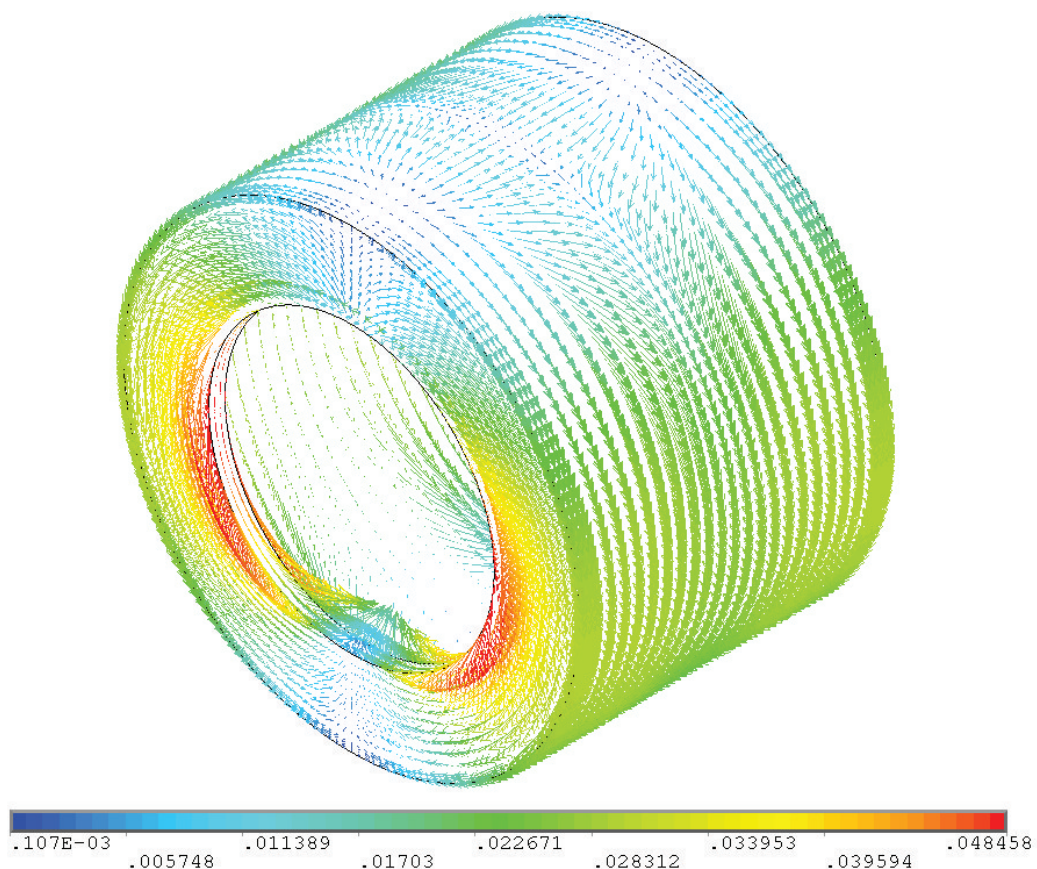
Obr. 4.17 Rozložení mag. indukce B [T] ve vnitřním magnetickém obvodu čidla



Obr. 4.18 Rozložení vektorů mag. indukce B [T] ve vnitřním magnetickém obvodu čidla



Obr. 4.19 Rozložení mag. indukce B [T] ve feromagnetickém stínění čidla

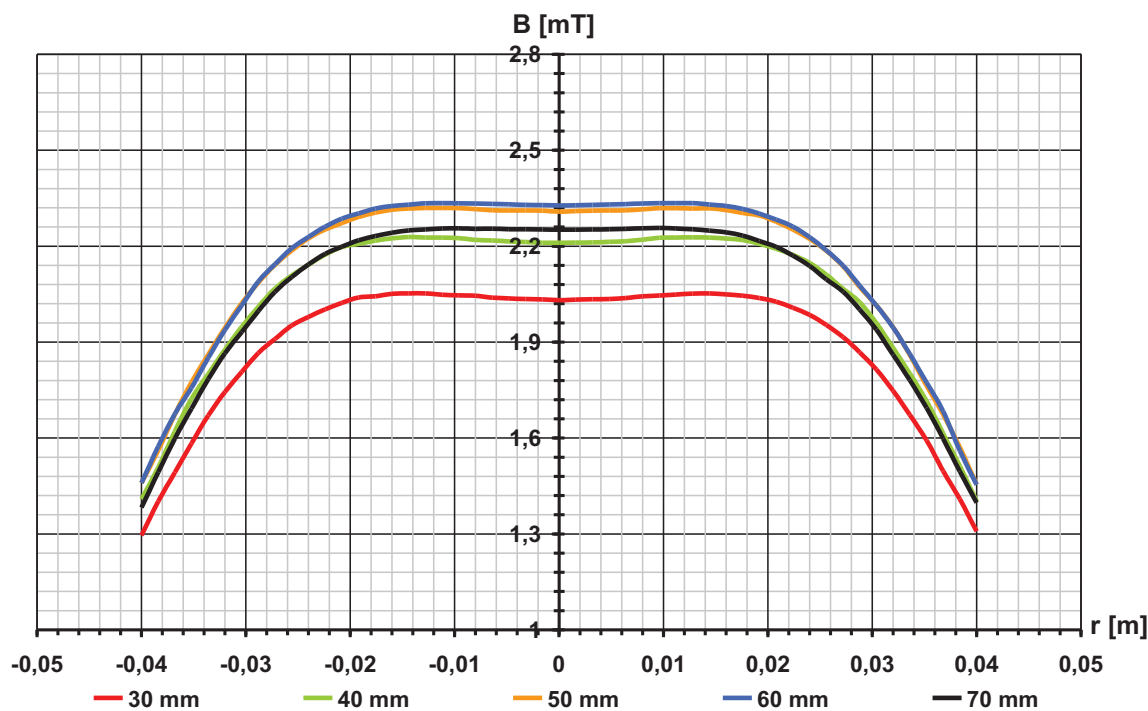


Obr. 4.20 Rozložení vektorů mag. indukce B [T] ve feromagnetickém stínění čidla

4.6 OPTIMALIZACE ČIDLA DN80 S VNITŘNÍM MAG. OBVODEM

Vzhledem k tomu, že v rámci numerické analýzy čidla DN80 v programu Ansys byl napsán programový skript s příkazy jazyku APDL, bylo možné provést částečnou optimalizační analýzu mag. obvodu. Postupně byly modifikovány rozměry pólových nástavců (jejich šířka a rozteč) a také rozměry vnitřního pláště, přičemž byl sledován průběh mag. indukce na spojnicí mezi elektrodami.

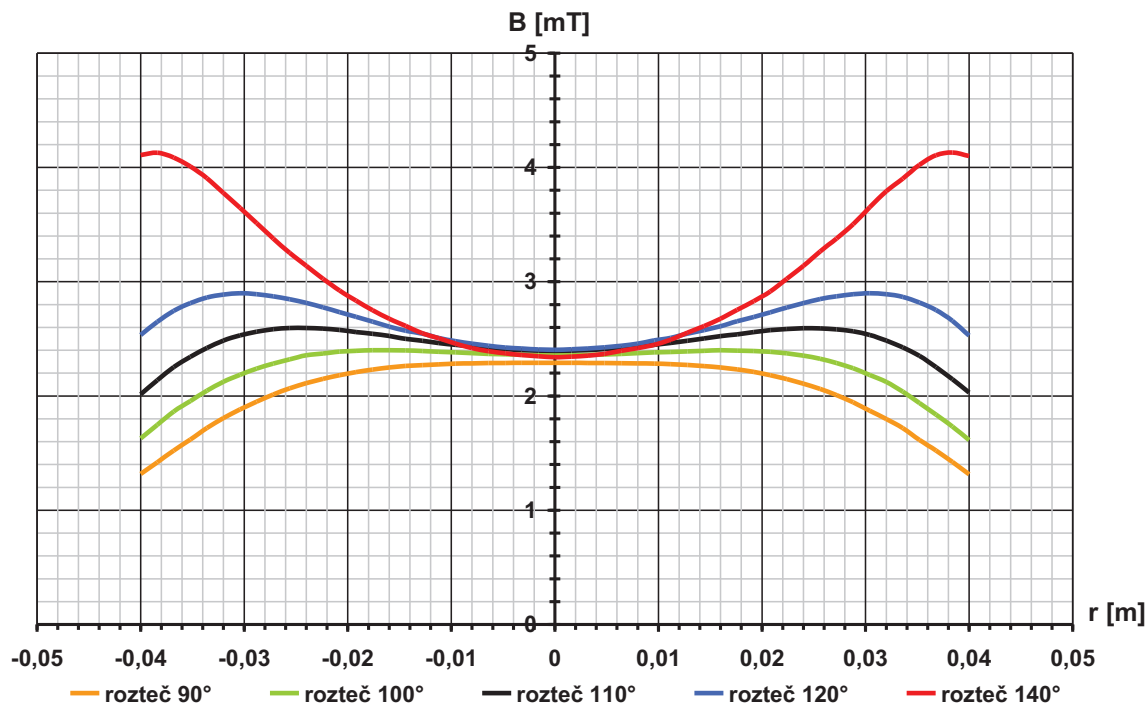
Optimalizační analýza ukázala, že výchozí šířka pólového nástavce 55 mm byla zvolena správně. Z grafu závislosti $B = f_{ce}(r)$ na Obr. 4.21 vyplývá optimální šířka mezi 50 ÷ 60 mm. Další rozšiřování nástavců již vede k poklesu celkové velikosti mag. indukce, patrně vlivem navýšení rozptylových toků mezi nástavci a prstencovými čely feromagnetického stínění.



Obr. 4.21 Rozložení mag. indukce B [mT] na spojnicí mezi elektrodami - $B = f_{ce}(r)$, různé šířky pólových nástavců, úhlová rozteč 95°

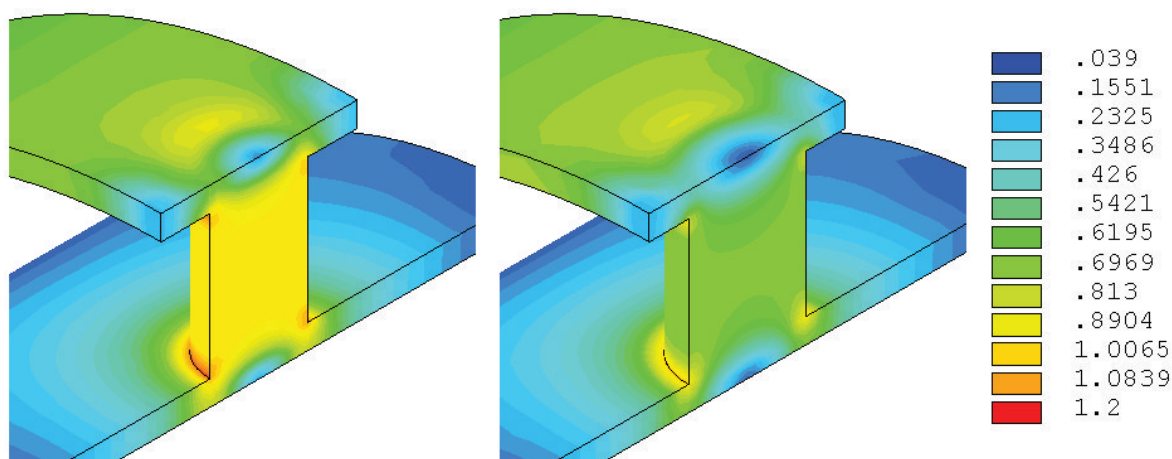
Jako nejvýhodnější se jeví úhlová rozteč v rozmezí $90^\circ \div 110^\circ$, při větší rozteči dochází ke zhušťování siločar mag. pole v oblasti elektrod, neboť se přibližováním pólových nástavců výrazně snižuje reluktance vzduchové mezery mezi jejich okraji. Výsledné rozložení mag. indukce na spojnicí vykazuje tedy pro rozteče nad 110° nežádoucí průběh, viz křivky závislosti $B = f_{ce}(r)$ na Obr. 4.22. Např. křivka pro rozteč 140° má velmi strmý nárůst mag. indukce v oblasti měření, což je nevhodné z hlediska

teorie váhových funkcí (zvyšuje se citlivost čidla na asymetrické rychlostní profily). Výraznější mag. pole v oblasti elektrod vzniká na úkor rozptylových mag. toků, protože velikost indukce je v okolí středu spojnice pro různé rozteče téměř konstantní.



Obr. 4.22 Rozložení mag. indukce B [mT] na spojnici mezi elektrodami - $B = f(r)$, různé úhlové rozteče pólových nástavců, šířka 55 mm

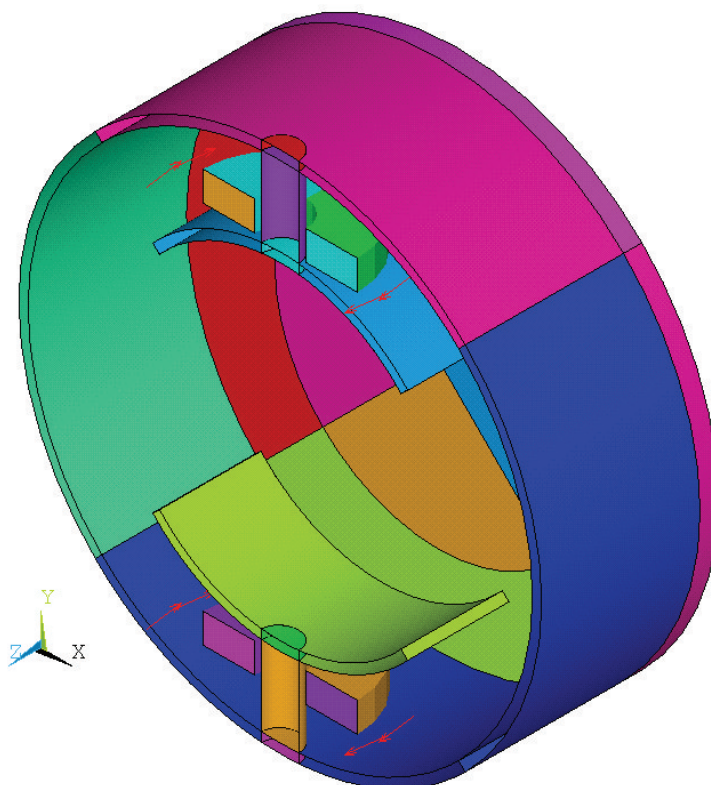
Nejvíce sycenými částmi mag. obvodu jsou jádra cívek. Protože mezi jádrem a cívkou byla zvolena mezera 2 mm, bylo možné snížit sycení, a tedy i reluktanci jader, zvětšením jejich průměru z původních 10 na 12 mm. Při stejném magnetomorickém napětí se tak zvýšil mag. tok "protlačovaný" skrze prostor měřicí trubice a tím i celková mag. indukce v průtočném průřezu čidla.



Obr. 4.23 Snížení sycení jádra cívky zvětšením jeho průřezu - mag. indukce B [T], rovina řezu yz , $x = 0$

4.7 ČIDLO DN80 S VNĚJŠÍM MAGNETICKÝM OBVODEM

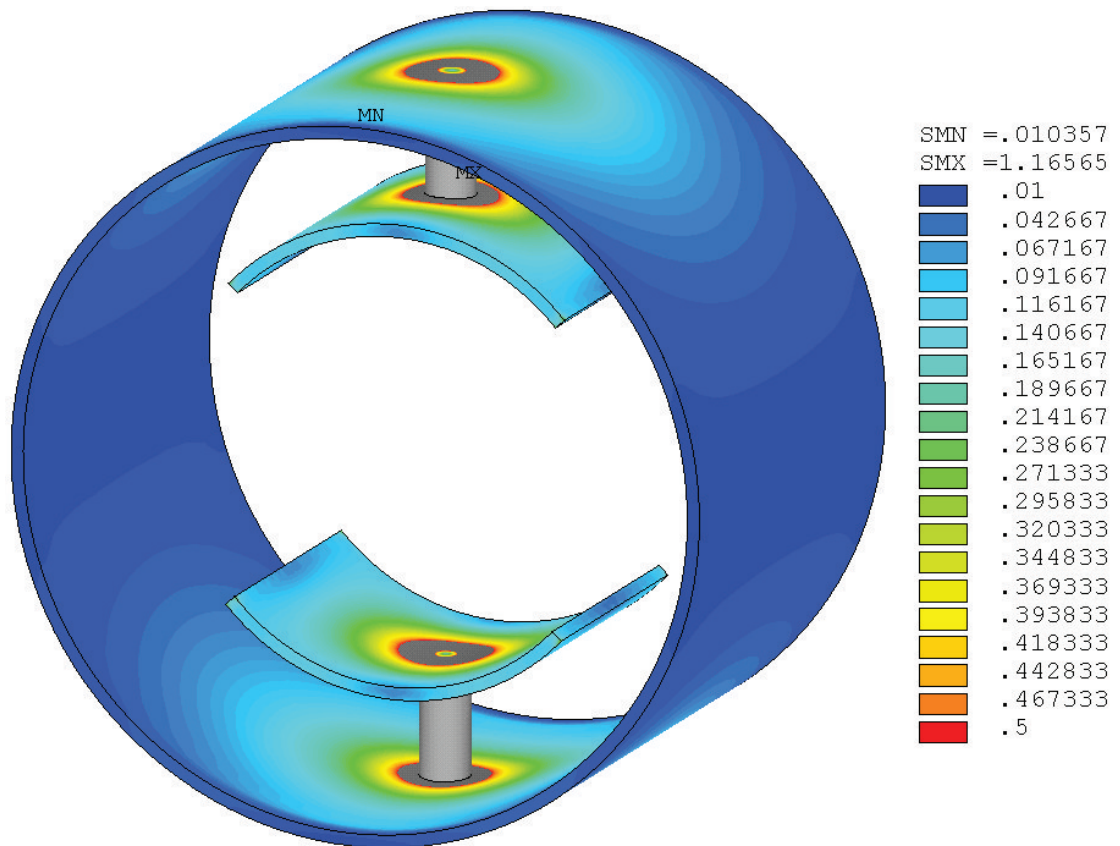
U této varianty čidla byl odstraněn vnitřní feromagnetický plášť (plech), jádra cívek byla prodloužena až na stínění. Veškeré ostatní geometrické rozměry zůstaly zachovány. Výhodou této koncepce je zvětšení vzduchové mezery a tedy i reluktance mezi pólovými nástavci a vnějším mag. obvodem - stíněním, přes které se uzavírá vybuzené mag. pole. Numerický výpočet byl proveden opět DSP metodou pro konečně prvkovou síť o 328 564 uzlech a 1 714 293 elementech.



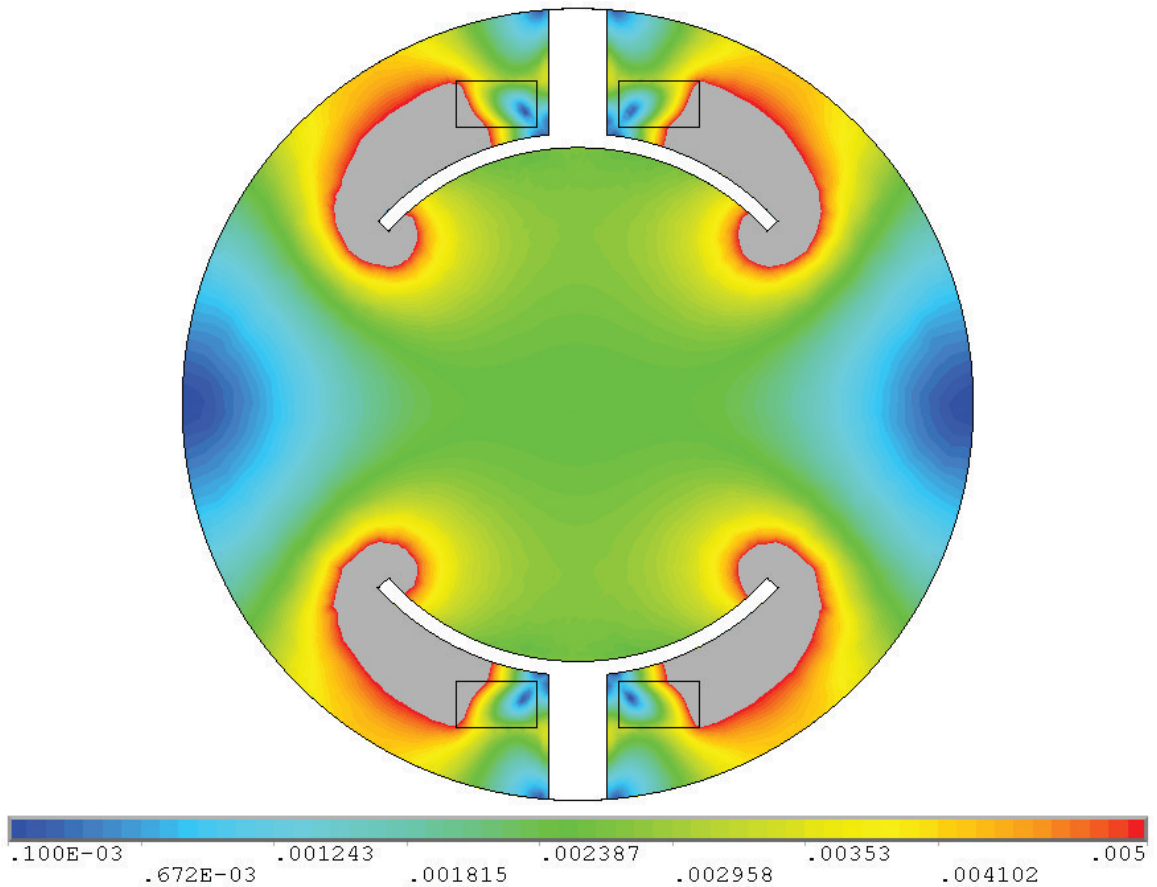
Obr. 4.24 Pohled na geometrii numerického modelu čidla s vnějším mag. obvodem (rovina řezu xy)

Vypočtené mag. pole má v oblasti měření analogické rozložení jako mag. pole čidla s vnitřním mag. obvodem (viz Obr. 4.26). Hlavní rozdíl spočívá v sycení feromagnetik původně tvořících stínění čidla, přes která se nyní kromě rozptylových toků uzavírá též hlavní mag. tok.

Střední hodnota celkové mag. indukce v průtočném průřezu vyšla $2,74 \text{ mT}$ (střední hodnoty složek: $B_{Xavg} = 0,214 \text{ mT}$, $B_{Yavg} = 2,715 \text{ mT}$). Přestože tato varianta čidla není stíněna, vnější mag. pole je opět velmi slabé. Je tedy pravděpodobné, že by čidlo mohlo splňovat podmínky EMC z hlediska elektromagnetické interference s okolím.



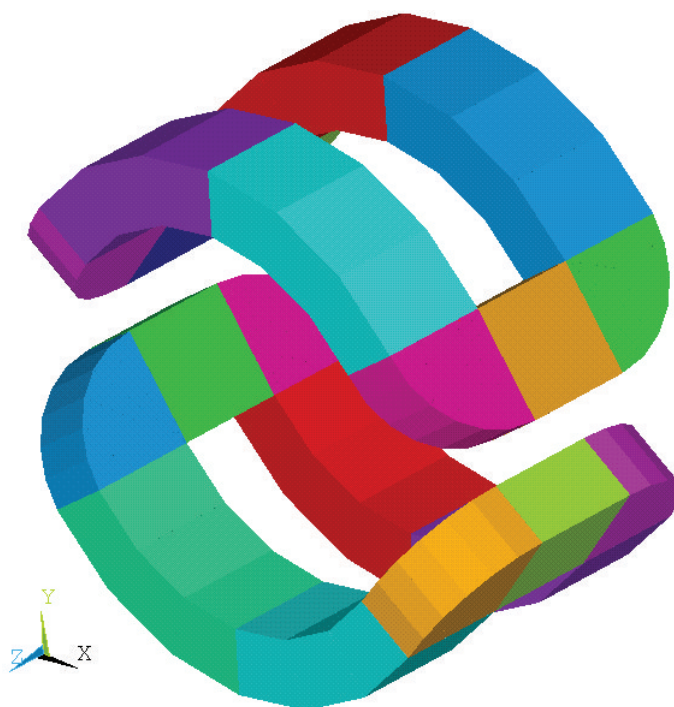
Obr. 4.25 Rozložení mag. indukce B [T] v čidle DN80 s vnějším magnetickým obvodem



Obr. 4.26 Rozložení mag. indukce B [T] ve vnitřním objemu čidla s vnějším mag. obvodem - rovina řezu xy

4.8 ČIDLO DN80 SE SEDLOVÝMI BUDICÍMI CÍVKAMI

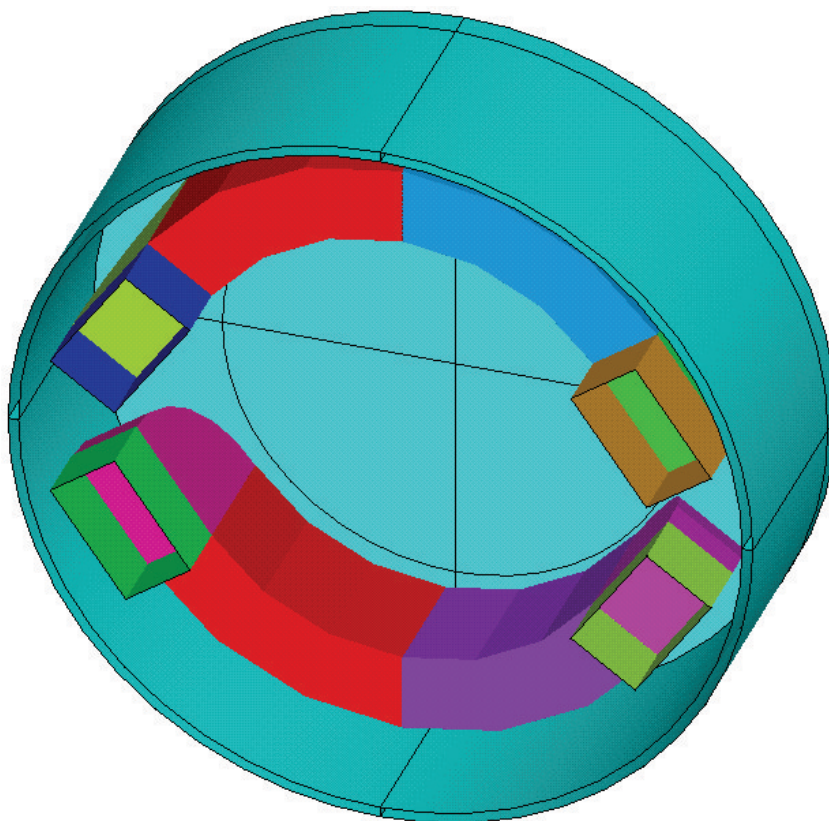
Rozměry sedlových budicích cívek pro čidlo DN80 opět poskytl pan Ing. Sedláček, Ph.D. Z důvodu jejich složitější geometrie již nebylo možné použít předdefinované makro RACE, a proto byl vytvořen vlastní programový skript s příkazy jazyku APDL, který generuje cívky sedlového tvaru libovolných rozměrů spojováním dílčích elementů SOURC 36, viz Obr. 4.27. Tato varianta čidla neobsahuje pólové nástavce, z feromag. částí je v numerickém modelu přítomno pouze stínění (Obr. 4.28). Numerická analýza mag. pole byla provedena pro diskretizační síť s 299 296 uzly a 1 545 974 elementy.



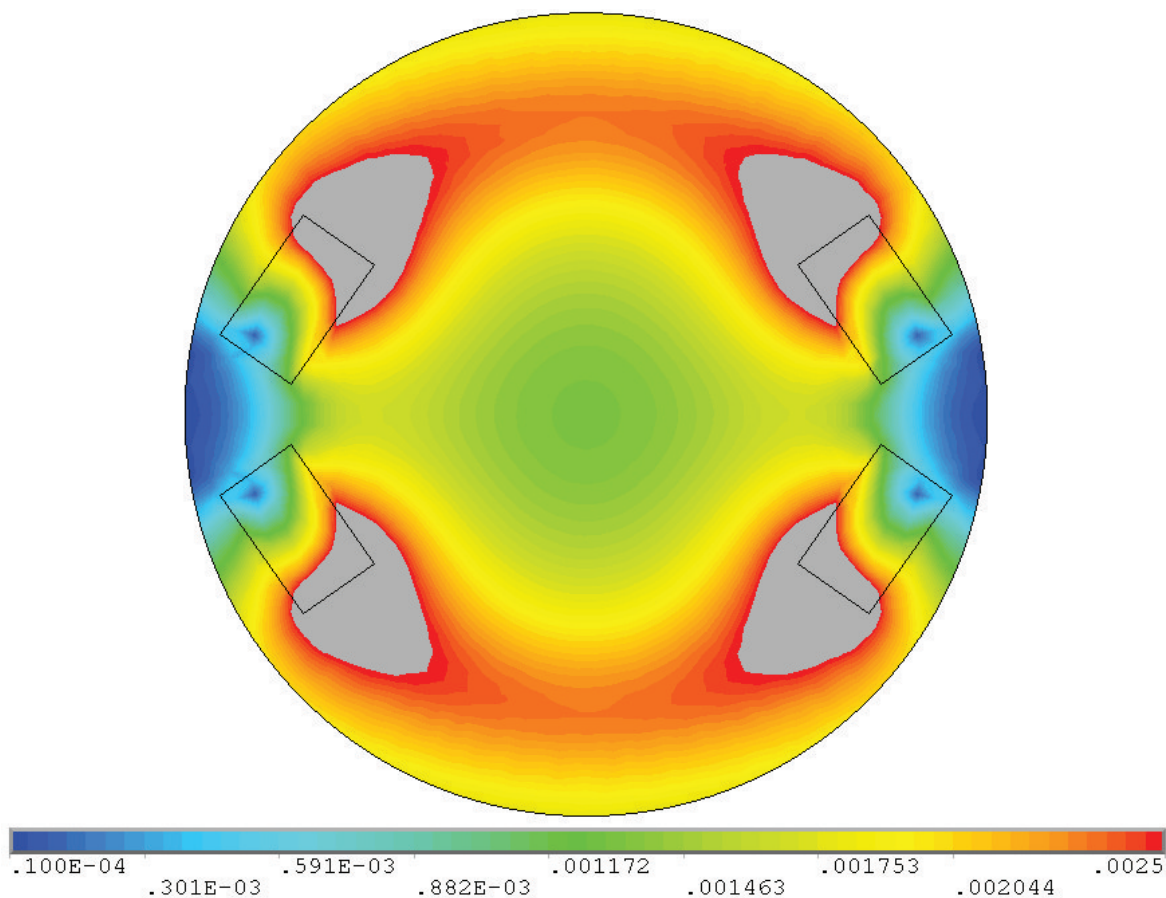
Obr. 4.27 Sedlové cívky čidla DN80 vytvořené elementem SOURC 36

Výsledné stacionární mag. pole ilustruje Obr. 4.29 (řez v rovině xy), respektive Obr. 4.30, na kterém jsou zobrazeny izoplochy mag. indukce ve vnitřním objemu čidla. V příloze diplomové práce č.2 jsou dále uvedeny grafy s prostorovým rozložením mag. indukce v průtočném průřezu měřicí trubice, v příloze č.3 pak další obrázky z programu Ansys mapující vybuzené mag. pole.

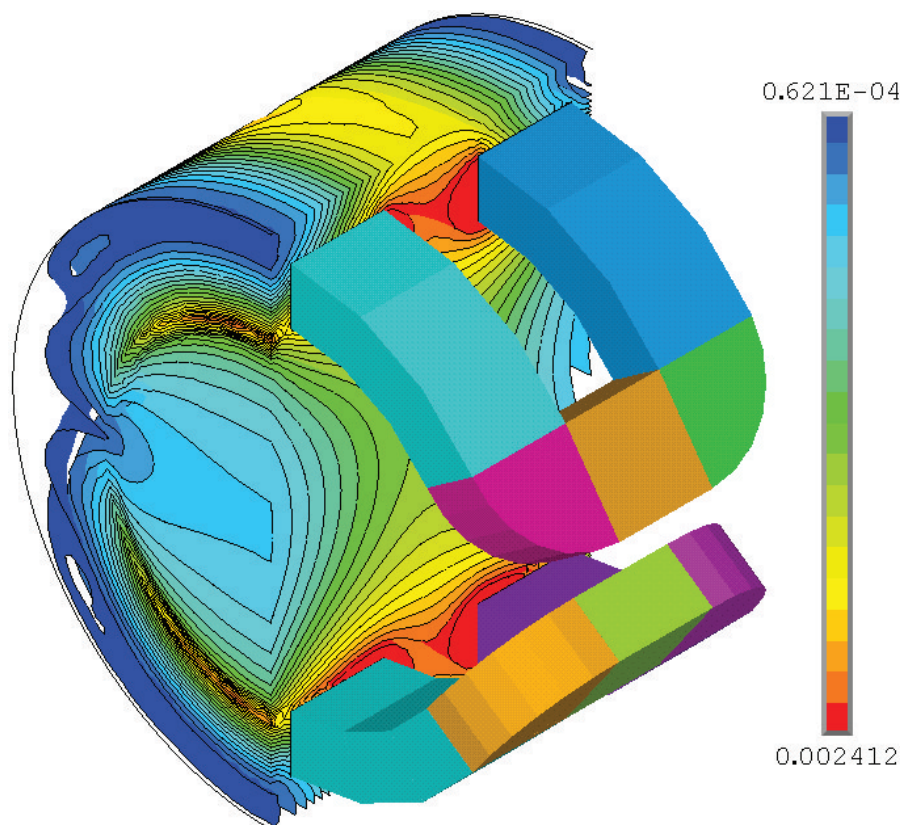
Sedlové cívky (o průřezu 15 x 25 mm - CAD model viz příloha č.11) vytvářejí v oblasti měření opět mag. pole s převládající y-ovou složkou. V blízkosti cívek nabývá pole na intenzitě, největších hodnot dosahuje v oblastech jejich vnitřních obvodů, přes které prochází největší mag. tok. Střední hodnota celkové mag. indukce v průtočném průřezu vyšla 1,58 mT (střední hodnoty složek: $B_{Xavg} = 0,15 \text{ mT}$, $B_{Yavg} = 1,569 \text{ mT}$).



Obr. 4.28 Sedlové cívky - pohled na geometrii numerického modelu čidla DN80 (rovina řezu xy)



Obr. 4.29 Sedlové cívky - rozložení mag. indukce B [T] ve vnitřním objemu čidla - rovina řezu xy , $z = 0$



Obr. 4.30 Sedlové cívky - rozložení mag. indukce B [T] ve vnitřním objemu čidla - rovina řezu yz , $x = 0$, zobrazení pomocí izoploch

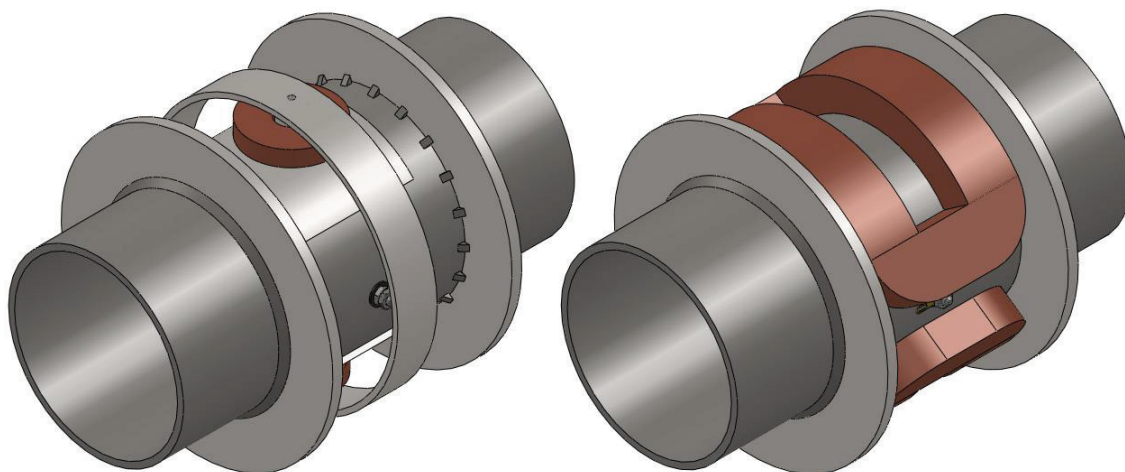
4.9 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT ČIDLA DN80

Na základě výsledků numerických analýz stacionárního mag. pole čidla DN80 v programu Ansys lze učinit několik důležitých závěrů. Jako výhodnější se jeví koncepce čidla s feromagnetickými prvky, které umožňují významně redukovat rozměry budících cívek, a tím uspořit značné množství mědi (Obr. 4.31). Zároveň lze potřebné mag. pole pro měření objemového průtoku vybudit při nižším příkonu čidla, respektive celého zařízení.

Vnitřní feromagnetický obvod umožňuje lépe "řídít" rozložení mag. pole ve vnitřním prostoru čidla. Důležité jsou zejména pólové nástavce, které usměřují mag. pole do oblasti měření. Takto navržené čidlo je obecně energeticky úspornější, a tedy i lépe použitelné např. pro bateriově napájené indukční průtokoměry.

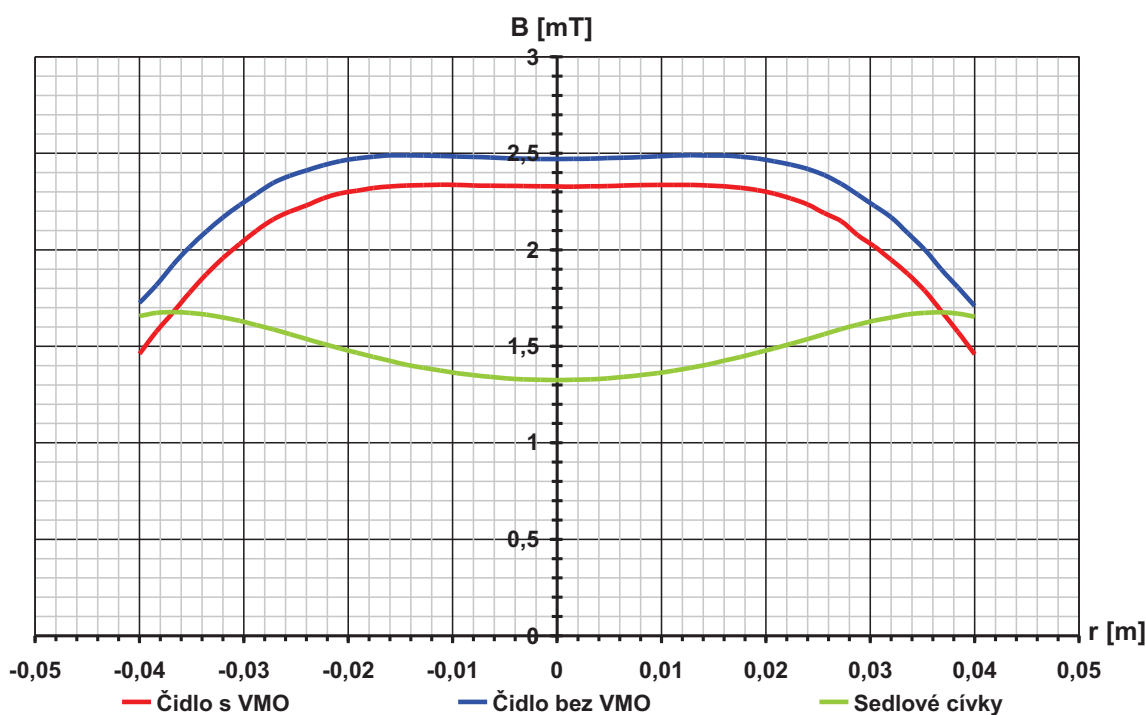
Největších hodnot mag. indukce na spojenci mezi elektrodami dosáhla varianta čidla bez vnitřního feromag. pláště, viz graf na Obr. 4.32. U této varianty se vybudené mag. pole uzavírá přes prstencová čela a vnější plášť, které v původním modelu tvořily stínění. Výhodou je tedy silnější mag. pole, větší prostor pro modifikaci cívek a též úspora konstrukčního materiálu - oceli (díky absenci vnitřního pláště). Další úspory oceli, při

prakticky totožných hodnotách mag. indukce, je možné dosáhnout zmenšením poloměru vnějšího pláště a čel. Nezodpovězenou otázkou zůstává elektromagnetická kompatibilita čidla s jeho bezprostředním okolím. Především by bylo nutné otestovat odolnost případného prototypu na cizí rušivá mag. pole, např. přiložením permanentního magnetu.



Obr. 4.31 Porovnání rozměrů budících cívek čidla DN80 (SolidWorks 2010)

Varianta čidla se sedlovými cívkami se jeví z energetického hlediska jako nejméně příznivá. Ačkoliv jsou cívky velmi robustní, díky absenci feromagnetických částí vykazuje mag. obvod celkově větší reluktanci, a tedy i při stejném budícím proudu 100 A je mag. indukce v průtočném průřezu nižší. Bylo by vhodné toto čidlo dodatečně doplnit pólovými nástavci a provést optimalizační výpočty za účelem redukce budících cívek.



Obr. 4.32 Rozložení mag. indukce B [mT] na spojnicí mezi elektrodami - $B = f(r)$, porovnání jednotlivých variant čidla DN80

5 SUCHÁ KALIBRACE ČIDLA - NUMERICKÁ ANALÝZA INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ NA SNÍMACÍCH ELEKTRODÁCH

Provedené numerické analýzy stacionárního mag. pole samy o sobě nedávají informaci o správné funkci čidla. Podle teoretického návrhu je potřeba vyhotovit prototyp a odzkoušet jeho činnost experimentálně v různých provozních stavech na zkušební kalibrační trati. Nedílnou součástí zkoušek musí být testování prototypu z hlediska již několikrát zmíněné EMC. Možnostem tzv. "suché kalibrace" čidla se věnuje následující kapitola, ve které jsou uvedeny základní poznatky z teorie indukčních průtokoměrů, umožňující získat informace o velikosti indukovaného napětí na snímacích elektrodách či o citlivosti čidla na různé rychlostní profily. Veškeré numerické analýzy byly realizovány pro variantu čidla s VMO - vnitřním magnetickým obvodem.

5.1 ZÁKLADNÍ ROVNICE ČIDLA INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU

Detailní postup při odvození základní rovnice pro rozložení elektrického potenciálu v čidle indukčního průtokoměru je uveden v publikaci *The Theory of Electromagnetic Flow-Measurement* [13], jejímž autorem je A. J. Shercliff. Odvození vychází z Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru a z Ohmova zákona, který popisuje vztah mezi proudovou hustotou a elektrickým polem vyvolaným pohybem elektricky vodivé kapaliny skrze měřicí trubici čidla

$$\mathbf{J} = \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (5.1)$$

kde \mathbf{J} [$A \cdot m^{-2}$] představuje vektor proudové hustoty, γ [$S \cdot m^{-1}$] el. vodivost kapaliny a výraz $(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ elektrické pole vytvořené jejím pohybem. Indukované napětí je snímáno při ustáleném mag. poli, nedochází tak k indukci vířivých proudů, a proto lze intenzitu el. pole vyjádřit el. skalárním potenciálem φ [V]

$$rot \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \rightarrow rot \mathbf{E} = 0 \quad (5.2)$$

$$\mathbf{E} = -grad \varphi = -\nabla \varphi$$

Zpětný vliv protékajících proudů v kapalině na vybuzené mag. pole cívek je možné zanedbat. Na základě zákona kontinuity pro stacionárního el. proud a divergováním

rovnice (5.1) při homogenní el. vodivosti ($\nabla \cdot \boldsymbol{\gamma} = 0$) lze získat konečnou podobu Poissonovy rovnice pro rozložení el. potenciálu

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{J} = 0 &= \operatorname{div} \cdot \boldsymbol{\gamma}(-\nabla\varphi + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ \Delta\varphi = \nabla^2\varphi &= \operatorname{div} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \nabla \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Parciální diferenciální rovnice (5.3) je základní rovnicí čidla indukčního průtokoměru. Z rovnice vyplývá, že indukovaný potenciál závisí na rychlostním profilu kapaliny a na způsobu rozložení vybuzeného mag. pole. Pro některé zjednodušené konfigurace indukčních průtokoměrů lze rovnici řešit analytickou cestou, ve většině případů je však možné řešení nalézt pouze numerickými výpočty.

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n} = \frac{\partial(\mathbf{v} \times \mathbf{B})}{\partial n} = 0 \quad (5.4)$$

Na vnitřní stěně nevodivé výstelky platí Neumannova okrajová podmínka s nulovou hodnotou, neboť u laminárního i turbulentního proudění se mezní vrstva kapaliny nepohybuje. Použitím vektorové identity a předpokladu, že mag. pole cívek není ovlivněno indukovanými proudy v kapalině, lze rovnici (5.3) upravit do tvaru

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{B} = 0 \rightarrow \Delta\varphi = \mathbf{B} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{v} = \mathbf{B} \cdot \nabla \times \mathbf{v} \quad (5.5)$$

5.2 POSTUP PŘI ŘEŠENÍ POISSONOVY ROVNICE PRO EL. POTENCIÁL

Výše uvedená Poissonova rovnice pro rozložení potenciálu v čidle indukčního průtokoměru byla vyřešena sekvenčně pomocí programu Ansys a výpočetního prostředí Matlab. Nejedná se o optimální algoritmus, výhodnější by bylo řešit tuto rovnici např. v MKP programu Comsol Multiphysics, který má v sobě zaimplementovaný obecný solver parciálních diferenciálních rovnic. Vzhledem k tomu, že v rámci ZČU je k dispozici pouze licence Class Kit, která slouží výhradně k účelům výuky, nebylo možné pro numerické simulace této diplomové práce program Comsol využít.

Z důvodu obtížného numerického algoritmu řešení byla Poissonova rovnice (5.3) vypočtena pouze ve dvou dimenzích - v průtočném průřezu měřicí trubice v rovině xy, pro variantu čidla s vnitřním magnetickým obvodem (dále jen s VMO). Jedná se tedy o značné zjednodušení fyzikální reality, neboť mag. pole je v objemu měřicí trubice

nehomogenní (viz kapitola č.4). Pro dosažení korektních výsledků by bylo nutné zvolit trojdimenzionální numerickou analýzu.

Použitý algoritmus řešení Poissonovy rovnice (5.3) ve 2D lze popsat ve čtyřech etapách:

- 1) Nejdříve se provádí export numerických dat stacionárního mag. pole z programu Ansys do textového souboru. Programový skript napsaný za tímto účelem je uvedený v příloze č.5.

Program Ansys nedisponuje elementem, který by umožňoval přímé řešení rovnice (5.3), pro výpočet rozložení el. potenciálu byl tedy zvolen rovinný element PLANE 121, který umožňuje vyřešit Poissonovu rovnici pro elektrostatické pole ve tvaru

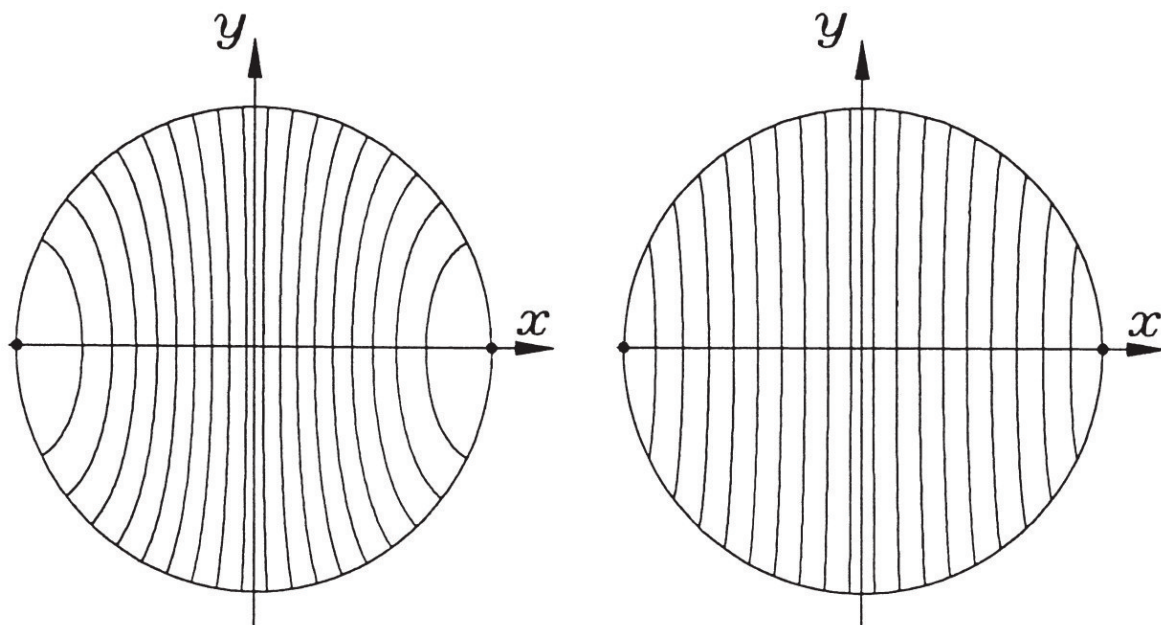
$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \rightarrow \rho = -\varepsilon_0 \cdot \nabla \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \varepsilon_r = 1 \quad (5.6)$$

kde $\rho [C \cdot m^{-3}]$ je objemová hustota náboje a $\varepsilon [F \cdot m^{-1}]$ permeabilita prostředí. Podíl $-\rho/\varepsilon$ bylo tedy potřeba upravit tak, aby odpovídal pravé straně rovnice (5.3).

- 1) Ve druhé fázi řešení je v Ansysu v průtočném průřezu čidla (v rovině xy) generována konečně prvková síť se čtyřstěnnými elementy PLANE 121. Souřadnice uzlů sítě jsou dalším skriptem s příkazy jazyku APDL automaticky uloženy do textového souboru pro další zpracování.
- 2) Textové soubory s daty mag. indukce a souřadnicemi uzlů jsou následně načteny do výpočetního prostředí Matlab, ve kterém se pro zvolený rychlostní profil dopočítává divergence vektorového součinu $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Numerické výsledky jsou opět ukládány do souboru s příponou .txt.
- 3) V poslední etapě algoritmu probíhá v programu Ansys numerická analýza elektrostatického pole pro výše uvedenou Neumannovu podmínku a pro nulový potenciál ve středu průtočného průřezu. Načtené hodnoty divergence (vynásobené hodnotou $-\varepsilon_0$) se před aktivací solveru nastaví do uzlů sítě pomocí programového cyklu jako objemová hustota náboje.

Poissonova rovnice (5.3) byla vyřešena pro diskretizační síť s 22 741 uzly a 11 244 elementy a pro laminární a turbulentní proudění se střední hodnotou rychlosti $1 m \cdot s^{-1}$. Matematická a grafická vyjádření použitých rychlostních profilů jsou uvedena

v podkap. 1.1.6, str. 17 až 20. Pro možnost porovnání získaných výsledků jsou na Obr. 5.1 uvedeny ekvipotenciály pro oba typy rychlostních profilů převzaté z odborného článku [9], jehož autory jsou K. W. Lim a M. K. Chung.



Obr. 5.1 Rozložení ekvipotenciál při laminárním (vlevo) a turbulentním (vpravo) proudění v průtočném průřezu čidla - rovina xy , $z = 0$ [9]

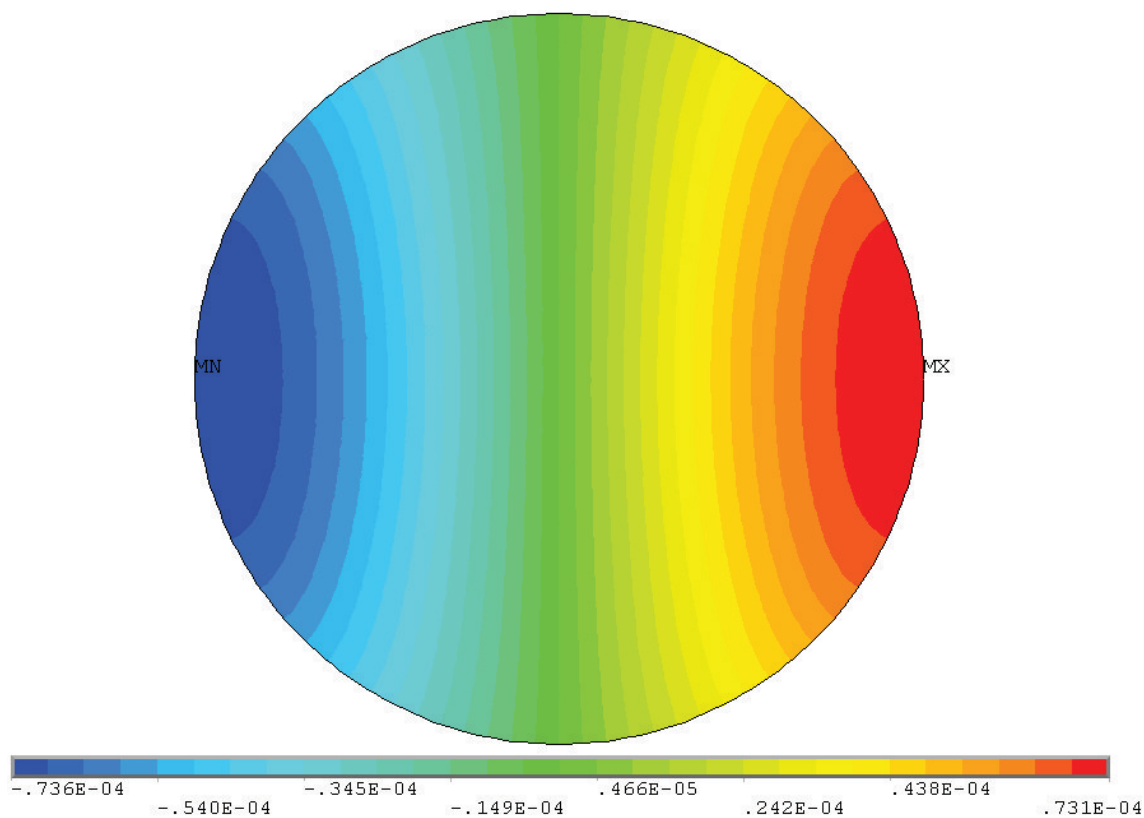
Je nutné zdůraznit, že autoři článku uvažovali pouze y -vou složku mag. indukce a bodové snímací elektrody. Rovnici (5.3) řešili metodou konečných objemů (FVM) pro identické rychlostní profily kapaliny.

5.3 VÝSLEDKY ŘEŠENÍ POISSONOVY ROVNICE PRO EL. POTENCIÁL

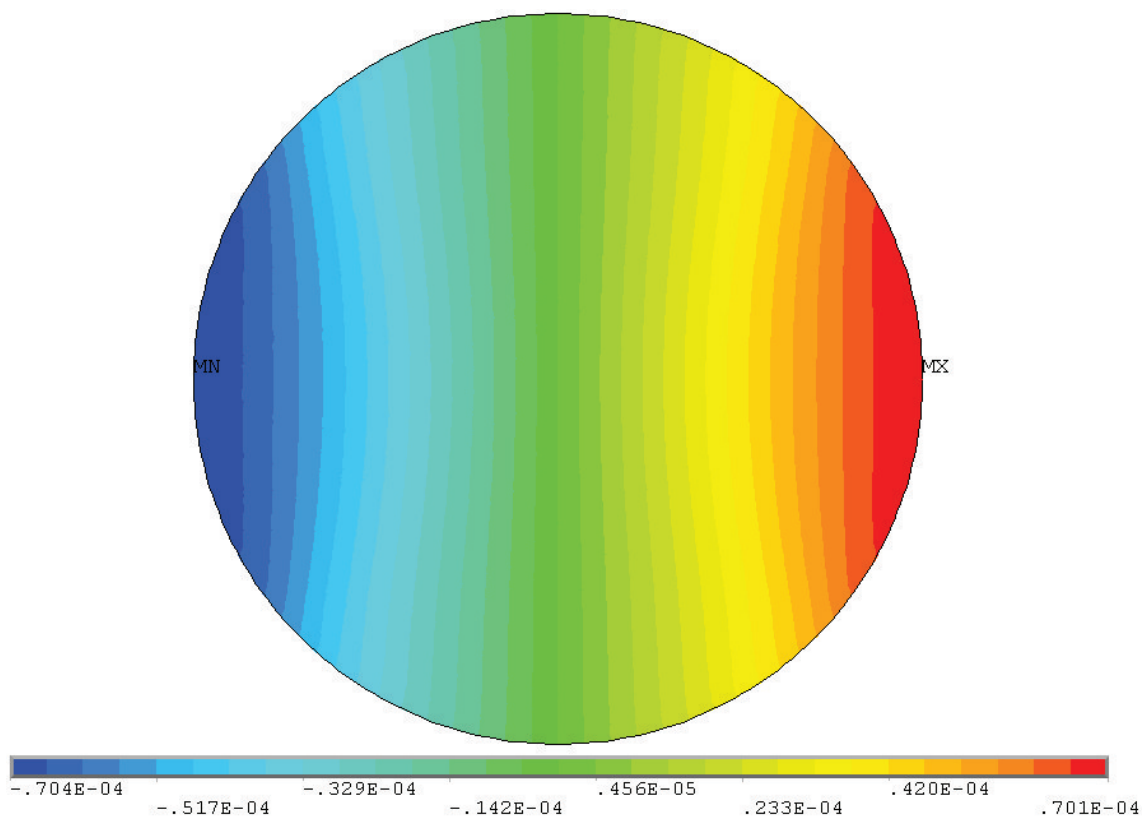
Výsledná rozložení el. skalárního potenciálu při respektování pouze y -ové složky mag. pole ilustrují Obr. 5.2 a Obr. 5.3 na následující straně. Z obrázků je patrna formální shoda s průběhy ekvipotenciál na Obr. 5.1. Lze tedy konstatovat, že aplikovaný numerický algoritmus i přes svoji značnou komplikovanost umožňuje získat použitelné výsledky.

Při laminárním proudění se na bodových snímacích elektrodách vyskytuje rozdíl potenciálů, tj. el. napětí, o velikosti $0,147 \text{ mV}$, při turbulentním pak $0,141 \text{ mV}$. Hodnoty el. napětí se téměř shodují s výsledkem $0,171 \text{ mV}$, jež byl spočítán podle vzorce (3.1).

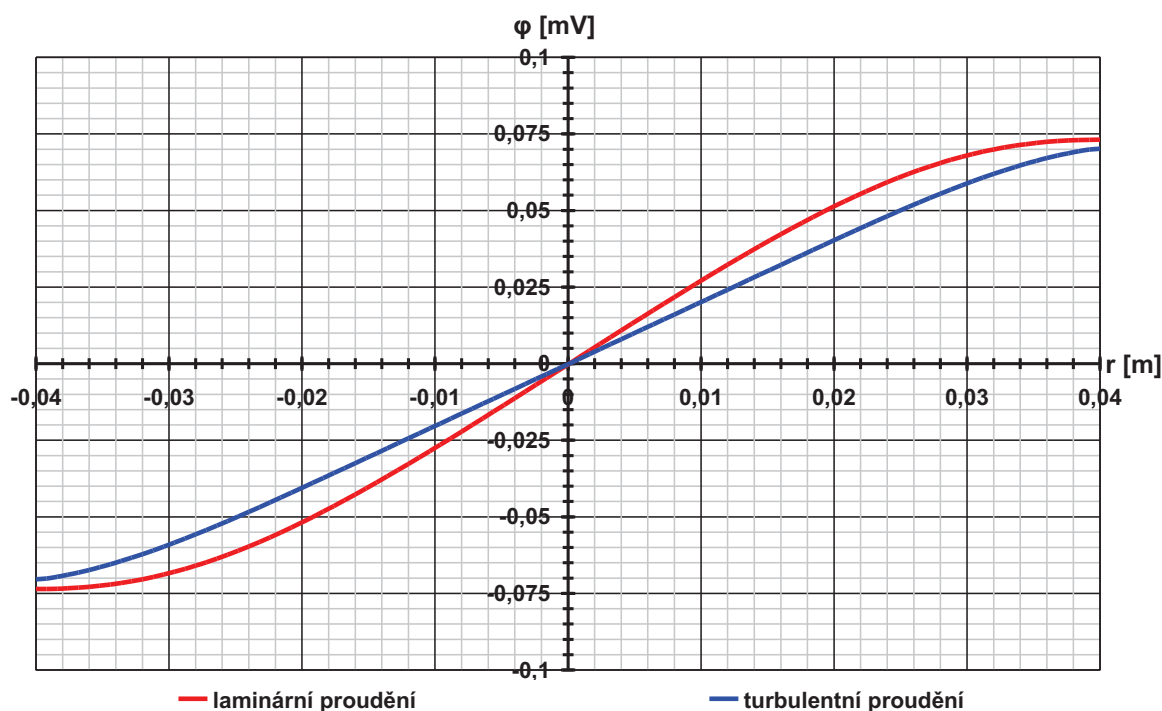
Průběh el. potenciálu na spojnici elektrod $\varphi = fce(r)$ znázorňuje graf na Obr. 5.4, jeho prostorové rozložení v průtočném průřezu čidla (pro laminární a asymetrický rychlostní profil - podkap. 5.4) pak grafy v příloze č.6.



Obr. 5.2 Rozložení el. potenciálu ϕ [V] v průtočném průřezu čidla při laminárním proudění - $\bar{V} = 1 \text{ ms}^{-1}$ respektování pouze y -ové složky mag. indukce, varianta s VMO - rovina řezu $xy, z = 0$



Obr. 5.3 Rozložení el. potenciálu ϕ [V] v průtočném průřezu čidla při turbulentním proudění - $\bar{V} = 1 \text{ ms}^{-1}$ respektování pouze y -ové složky mag. indukce, varianta s VMO - rovina řezu $xy, z = 0$



Obr. 5.4 Rozložení el. potenciálu φ [V] na spojnici mezi elektrodami, varianta čidla s VMO - $\varphi = fce(r)$

Dalšími numerickými výpočty byl ověřen vliv x-ové složky mag. indukce na velikost el. napětí mezi elektrodami. Ukázalo se, že zanedbání této složky nevede k výraznější změně výsledků, pouze se mění rozložení el. potenciálu resp. jeho ekvipotenciál, viz obrázky v příloze č.7. Při laminárním proudění vyšla hodnota $0,145 \text{ mV}$ a při turbulentním $0,141 \text{ mV}$. Malý vliv x-ové složky lze vysvětlit pomocí průběhu váhové funkce čidla indukčního průtokoměru, která je podrobně analyzována v podkap. 5.5.

5.4 CITLIVOST ÚDAJE ČIDLA NA ASYMETRICKÝ RYCHLOSTNÍ PROFIL

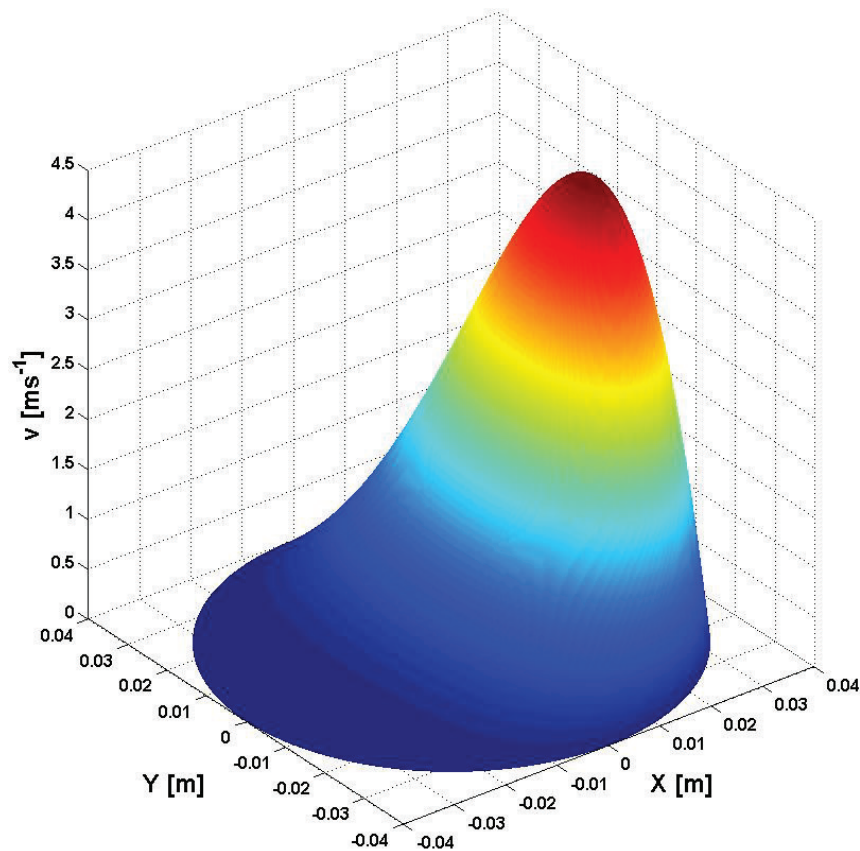
Totožná el. napětí na elektrodách pro oba typy proudění poukazují na necitlivost údaje měření na symetrické rychlostní profily. Jinými slovy, dojde-li ke změně rozložení rychlostního profilu kapaliny protékající čidlem, při zachování jeho osové symetričnosti bude měřený signál nadále úměrný střední hodnotě rychlosti proudění.

V rámci této podkapitoly byla vyšetřena citlivost čidla na asymetrický rychlostní profil. Aby byly získané výsledky porovnatelné s těmi pro laminární a turbulentní proudění, byla zachována střední hodnota rychlostního profilu $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Matematické vyjádření použitého profilu bylo převzato z diplomové práce *Electromagnetic Flowmeters* [8], jejímž autorem je M. B. van Leeuwen. Prostorové rozložení rychlosti v průtočném průřezu čidla ilustruje graf na Obr. 5.5 na následující straně.

Matematické vyjádření asymetrického rychlostního profilu:

$$v(r, \varphi) = \frac{32}{33} \cdot (1 - r^2) \cdot (r \cdot \cos \varphi + 1)^4 \quad (5.7)$$

Numerický výpočet Poissonovy rovnice (5.3) byl proveden pro stejnou konfiguraci konečně prvkové sítě, opět se zanedbáním x-ové složky mag. indukce. Pozměněna byla pouze poloha místa s nulovým potenciálem, a to podle distribuce diskrétních hodnot výrazu $\nabla \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$. Výsledné rozložení el. potenciálu ukazuje Obr. 5.6.

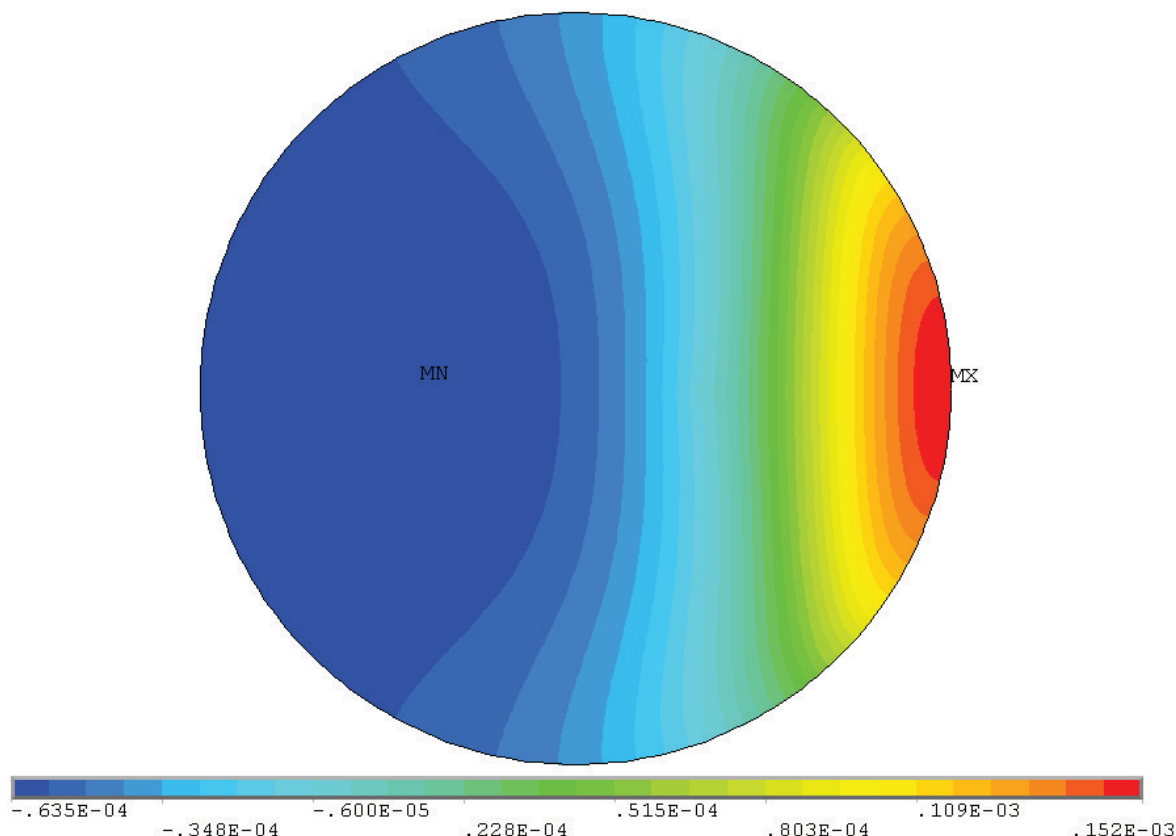


Obr. 5.5 Grafické zobrazení asymetrického rychlostního profilu - $\bar{V} = 1 \text{ ms}^{-1}$, $V_{max} = 4,2 \text{ ms}^{-1}$, $v = fce(x,y)$

El. napětí na bodových elektrodách dosáhlo hodnoty $0,214 \text{ mV}$, což je o 50% více než v případě laminárního a turbulentního rychlostního profilu. Průtokoměr by tedy v tomto případě měřil průtok měřené kapaliny se značnou chybou. Při respektování obou složek mag. indukce opět nedošlo k významné změně výsledků, el. napětí vyšlo $0,208 \text{ mV}$.

Z provedené numerické analýzy lze vyvodit závěr, že čidlo indukčního průtokoměru musí být instalováno v těch místech potrubí, kde je ustálený a úplně vyvinutý rychlostní profil, nejlépe laminárního charakteru. Např. firma Elis a.s. ve svém manuálu pro čidlo Flonet doporučuje dodržet před průtokoměrem minimální uklidňující délku

potrubí 5 DN a za průtokoměrem 3 DN. Pokud by tato délka nebyla dodržena a čidlo by se nacházelo v blízkosti ohybu či odbočky potrubí, kde vlivem turbulencí vzniká asymetrický rychlostní profil, mohlo by dojít ke značnému zkreslení měření průtoku.



Obr. 5.6 Rozložení el. potenciálu ϕ [V] v průtočném průřezu čidla pro asymetrický profil - $\bar{V} = 1 \text{ ms}^{-1}$ respektování pouze y -ové složky mag. indukce, varianta s VMO - rovina řezu $xy, z = 0$

Podobný efekt na údaj měření má též částečně zaplněné potrubí či zavzdušnění průtokoměru. Čidlo proto není vhodné umístit v nejvyšším místě potrubí (tzv. horní kapsa) nebo ve svislé poloze při průtoku kapaliny směrem shora dolů, zvláště následuje-li výtok do otevřeného prostoru. V případě, že nelze zajistit trvalé zaplavení měřicí trubice, je možné vytvořit na potrubí dolní kapsu.

5.5 TEORIE VÁHOVÝCH FUNKCÍ ČIDLA INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU

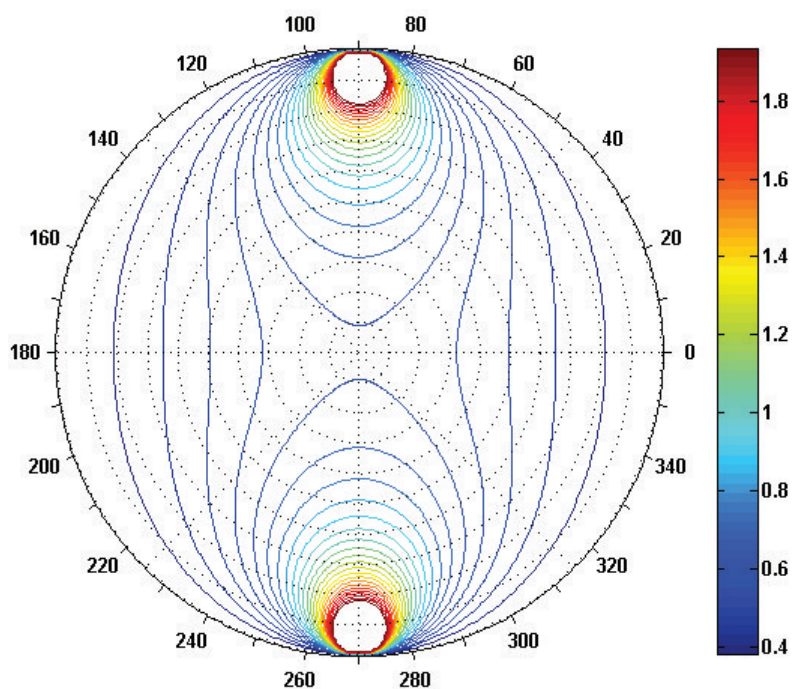
Základní teorii váhových funkcí čidla indukčního průtokoměru jako první zformuloval v roce 1954 A. J. Shercliff, své poznatky shrnul v ucelené formě v publikaci *Relation between the Velocity Profile and the Sensitivity of Electromagnetic Flowmeters* [14]. A. J. Schercliff odvodil rozložení váhové funkce (angl. Weight Function) v průtočném průřezu čidla analytickým řešením Poissonovy rovnice (5.3) pro bodové elektrody, homogenní magnetické pole s transversální složkou mag. indukce a přímočarý rychlostní

profil kapaliny. Ukázalo se, že váhové funkce představují velmi efektivní nástroj pro citlivostní analýzy čidla, neboť popisují, do jaké míry přispívá každý bod rychlostního profilu kapaliny k celkové velikosti indukovaného napětí. Jinak řečeno, libovolnému bodu s příslušnou rychlostí proudění je těmito funkcemi přiřazen váhový koeficient, který může nabývat hodnot z intervalu $(0, \infty)$. Podle výsledné distribuce váhových koeficientů v průtočném průřezu čidla lze tedy vyhodnotit jeho citlivost na různé rychlostní profily.

Analytickým výpočtem Poissonovy rovnice (5.3) je možné dospět k řešení ve tvaru

$$U(\varphi_{el}) = \iint_{S_D} v_z(r, \varphi) \cdot W(r, \varphi) \cdot r \, dr d\varphi \quad (5.8)$$

Na levé straně rovnice (5.8) figuruje hodnota indukovaného napětí, úhlová souřadnice φ_{el} koresponduje s umístěním snímací elektrody na vnitřní stěně výstelky. Na pravé straně se nachází funkce $v_z(r, \varphi)$, charakterizující rychlostní profil kapaliny v ose z, násobená váhovými koeficienty $W(r, \varphi)$. Integrace součinu těchto funkcí přes průtočný průřez pak vede na hledanou hodnotu $U(\varphi_{el})$. [8]



Obr. 5.7 Izolinie váhové funkce v průtočném průřezu čidla - bodové elektrody, $\varphi_1 = 90^\circ$, $\varphi_2 = 270^\circ$

Z matematického vyjádření (5.9) pro váhovou funkci z řešení (5.8) vyplývá, že její tvar v průtočném průřezu je ovlivněn polohou bodových elektrod a konfigurací mag. obvodu čidla, tj. rozložením vybuzeného mag. pole. Samozřejmě též záleží na tvaru měřicí trubice.

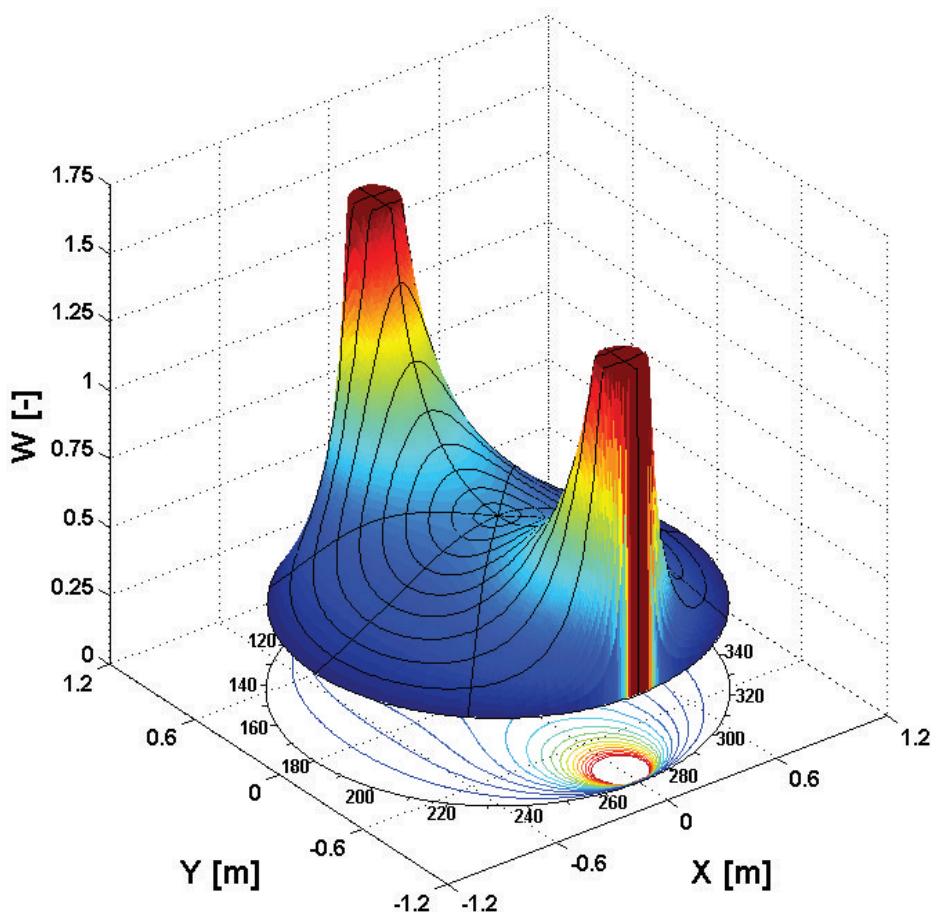
Matematické vyjádření váhové funkce řešení (5.8) - polární souřadnice (převzato z [8])

$$W(r, \varphi) = \frac{1}{\pi} (W_1(r, \varphi) + W_2(r, \varphi))$$

$$W_1(r, \varphi) = \left(B_y(r, \varphi) \cdot \frac{\sin \varphi_{el} - r \cdot \sin \varphi}{1 - 2 \cdot r \cdot \cos(\varphi - \varphi_{el}) + r^2} \right) \quad (5.9)$$

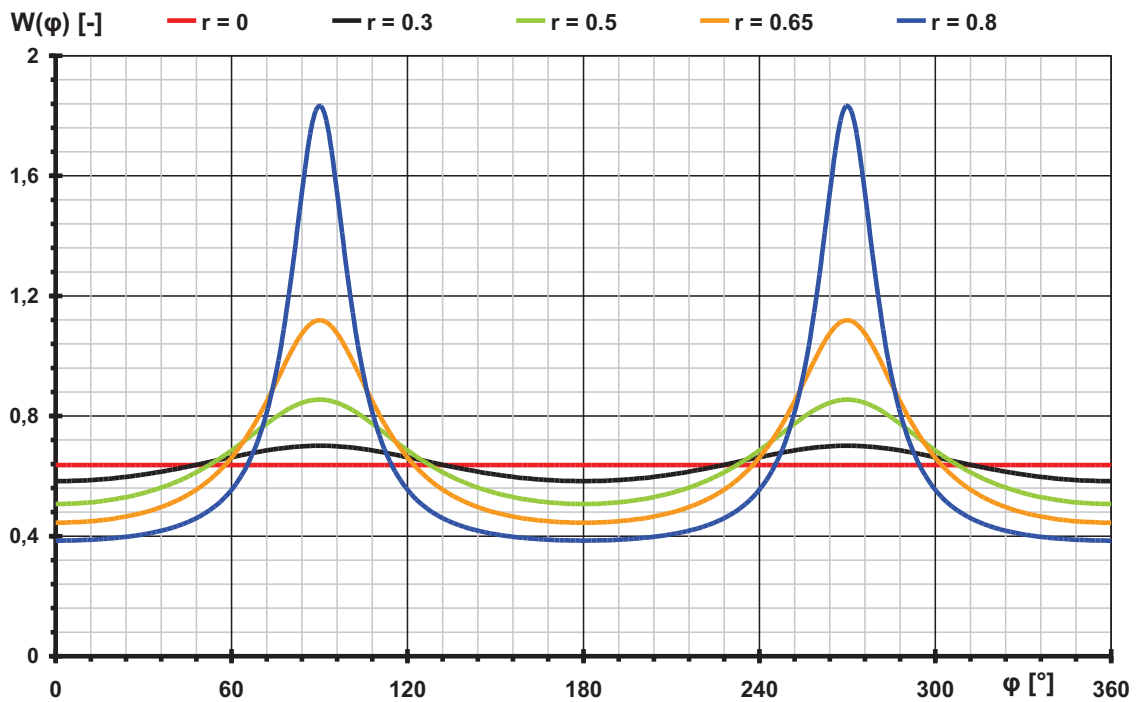
$$W_2(r, \varphi) = \left(B_x(r, \varphi) \cdot \frac{r \cdot \cos \varphi - \cos \varphi_{el}}{1 - 2 \cdot r \cdot \cos(\varphi - \varphi_{el}) + r^2} \right)$$

Grafické vyjádření váhové funkce (při zanedbání složky $W_2(r, \varphi)$, $B_x(r, \varphi) \doteq 0$ a při uvažování $B_y(r, \varphi) = 1 \text{ T}$), ilustrují Obr. 5.7 a Obr. 5.8. Z nich je patrný značně nehomogenní průběh funkce, v blízkosti elektrod hodnoty váhových koeficientů strmě narůstají (teoreticky neomezeně). To znamená, že rychlostní profil kapaliny v těchto místech přispívá k výslednému el. napětí větší měrou než proudění v jiné části průtočného průřezu. V prostoru mimo snímací elektrody je naopak citlivost čidla na rychlostní profil snížena, koeficienty mají hodnoty menší než jedna.



Obr. 5.8 Prostorové rozložení váhové funkce - bodové elektrody, $\varphi_1 = 90^\circ$, $\varphi_2 = 270^\circ$

Obr. 5.9 ukazuje průběhy váhové funkce v závislosti na úhlové souřadnici pro různé poloměry. Integrací jednotlivých průběhů lze snadno dokázat, že střední hodnota každého z nich je konstantní a že odpovídá koeficientu pro nulový rádius. Jinak řečeno, zvětšená citlivost čidla v oblasti elektrod (90° a 270°) je na stejném poloměru plně kompenzována sníženými koeficienty mimo tuto oblast.



Obr. 5.9 Grafické rozložení váhových koeficientů - $W = f(\varphi)$, $r = \text{konst.}$

Výše pospaná vlastnost váhové funkce verifikuje numerické výsledky obdržené přímým řešením Poissonovy rovnice pro zvolené rychlostní profily z podkap. 5.3 a 5.4. V případě symetrických rychlostních profilů měří čidlo objemový průtok kapaliny zcela korektně, nehomogenní průběh váhové funkce se na velikosti indukovaného napětí neprojeví. U asymetrických průběhů tomu tak logicky není, avšak při dodržení zásad správné instalace čidla by se tento negativní atribut čidla neměl projevit. Nutno poznamenat, že použitý asymetrický profil (5.7) má pouze ilustrativní charakter, reálné poruchy proudění by nevykazovaly tak velké gradienty rychlosti a tak značnou asymetričnost.

Grafy prostorového rozložení váhové funkce (5.9) pro x-vou složku mag. indukce (viz příloha č.8) potvrzují její malý vliv na přesnost 2D numerických výpočtů v průtočném průřezu čidla. X-ová složka mag. indukce dosahuje výrazných hodnot pouze v blízkosti pólových nástavců či sedlových cívek, kde jsou příslušné koeficienty váhové funkce

prakticky nulové, složka je tedy téměř neutralizována a fakticky nepřispívá k výslednému el. napětí na snímacích elektrodách.

5.5.1 Váhové funkce čidla - metoda virtuálního proudu

V roce 1970 M. K. Bevir [3] rozšířil Schercliffovu metodu váhových funkcí (WFM) na trojdimenzionální případ a stanovil nutné a postačující podmínky pro ideální indukční průtokoměr, u kterého by měřený signál závisel pouze na střední rychlosti proudění a ne na tvaru rychlostního profilu. Bevir odvodil, že výsledné el. napětí na elektrodách lze určit výpočtem vztahu

$$\Delta U = \int_{\Omega} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \cdot \mathbf{j}_V d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v} \cdot \mathbf{W} d\Omega, \quad \mathbf{W} = \mathbf{B} \times \mathbf{j}_V \quad (5.10)$$

kde \mathbf{j}_V je hustota tzv. virtuálního proudu, která charakterizuje stacionární proudového pole vytvořené mezi elektrodami proudem jednotkové velikosti při nepohybující se kapalině, \mathbf{W} představuje vektorovou váhovou funkci a Ω průtočný objem měřicí trubice čidla.

Z rovnice (5.10) je zřejmá závislost signálu čidla, resp. jeho váhové funkce, na konfiguraci elektrodového systému (tj. na tvaru a velikosti snímacích elektrod), který je jednoznačně určen rozložením virtuálního proudu v prostoru měřicí trubice, a též na konfiguraci mag. obvodu, který generuje potřebné mag. pole. Bevirova metoda virtuálního proudu by tedy měla vést k získání přesnějších výsledků, než analytické váhové funkce odvozené pro bodové elektrody.

Z matematického hlediska je hustota virtuálního proudu gradientem skalární funkce G , jež je řešením Laplaceovy rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami pro vnitřní povrch měřicí trubice a pro snímací elektrody

$$\mathbf{j}_V = \nabla G = \text{grad } G \quad \Delta G = \nabla^2 G = 0 \quad (5.11)$$

Podmínku pro ideální čidlo průtokoměru lze na základě Bevirových poznatků psát ve tvaru

$$\text{rot } \mathbf{W} = \text{rot } (\mathbf{B} \times \mathbf{j}_V) = \text{rot } (\nabla F \times \nabla G) = 0 \quad (5.12)$$

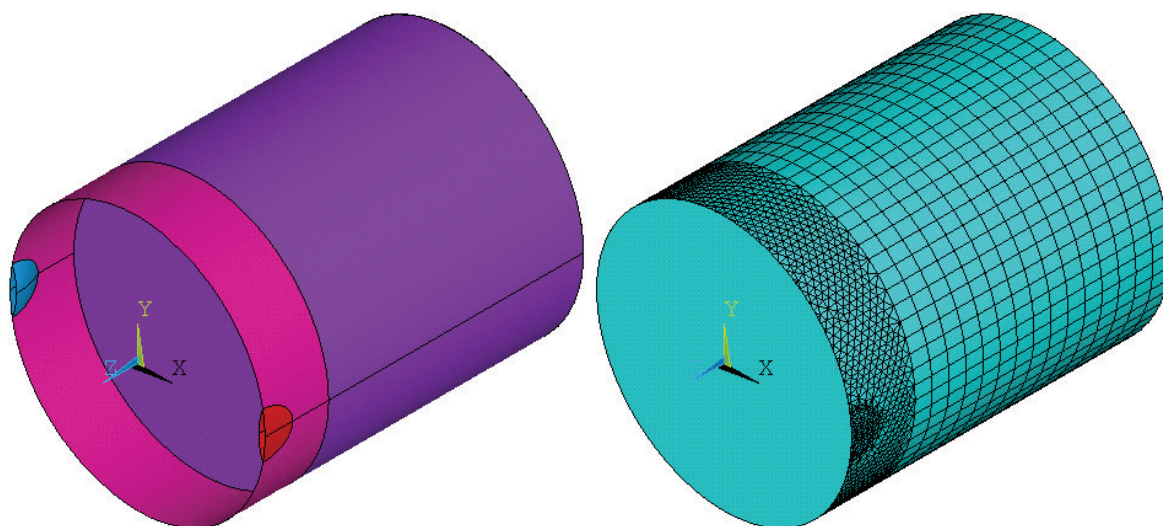
kde F je skalární funkce charakterizující mag. pole v objemu měřicí trubice, za předpokladu zanedbatelného vlivu indukovaných proudů v kapalině. Při praktické realizaci čidla však není možné podmínku (5.12) zcela splnit.

Pro přímočarý rychlostní profil $\mathbf{v} = (0, 0, v_z)$ má význam počítat pouze se z-ovou složkou vektoru váhové funkce, pro kterou podle vektorového součinu $\mathbf{B} \times \mathbf{j}_v$ platí

$$W_z(x, y) = B_x \cdot j_{vy} - B_y \cdot j_{vx} \quad (5.13)$$

5.5.2 Výpočet váhové funkce pomocí metody virtuálního proudu

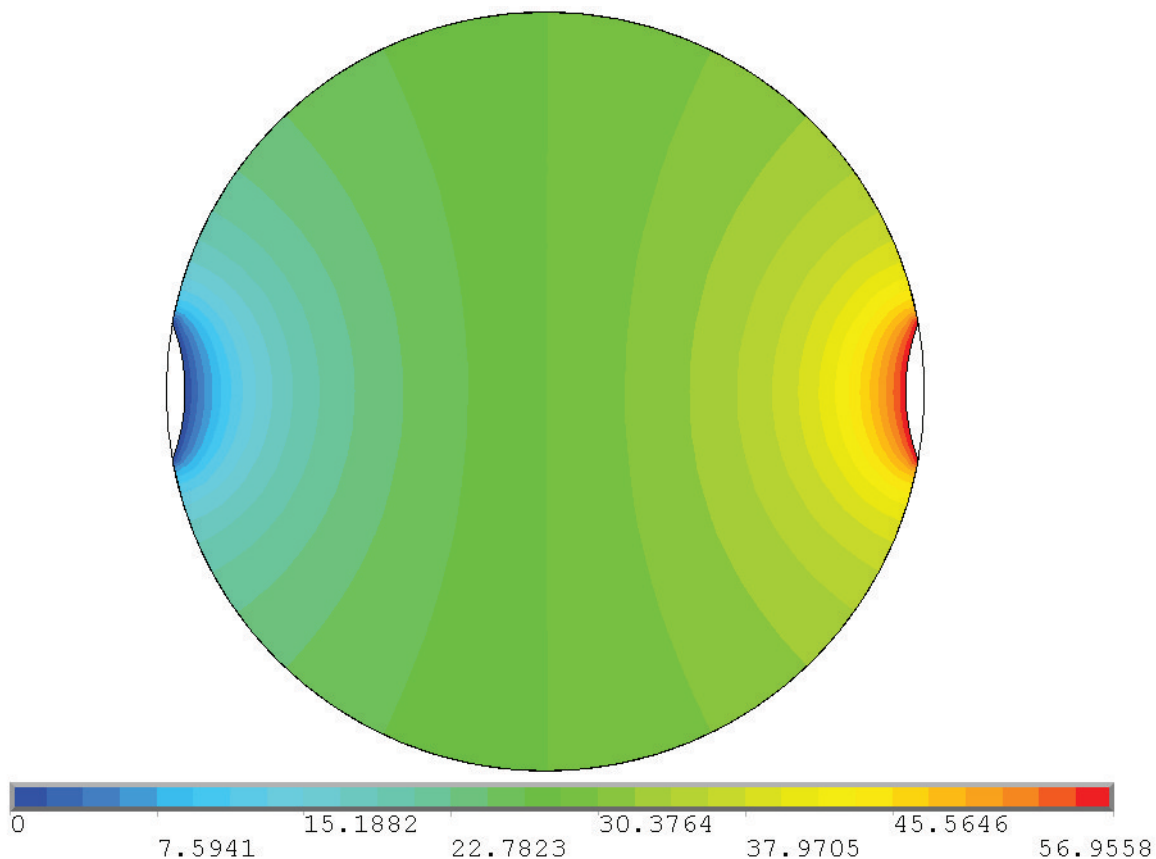
Numerická analýza rozložení hustoty virtuálního proudu v objemu měřicí trubice byla provedena opět v programu Ansys. Pro účely analýzy byl zvolen dvaceti-uzlový element SOLID 231, který umožňuje řešit obecná trojdimenzionální elektrická pole. Skalární funkce G je tedy reprezentována rozložením el. potenciálu, vypočteného na základě řešení Laplaceovy rovnice pro stacionární 3D proudové pole.



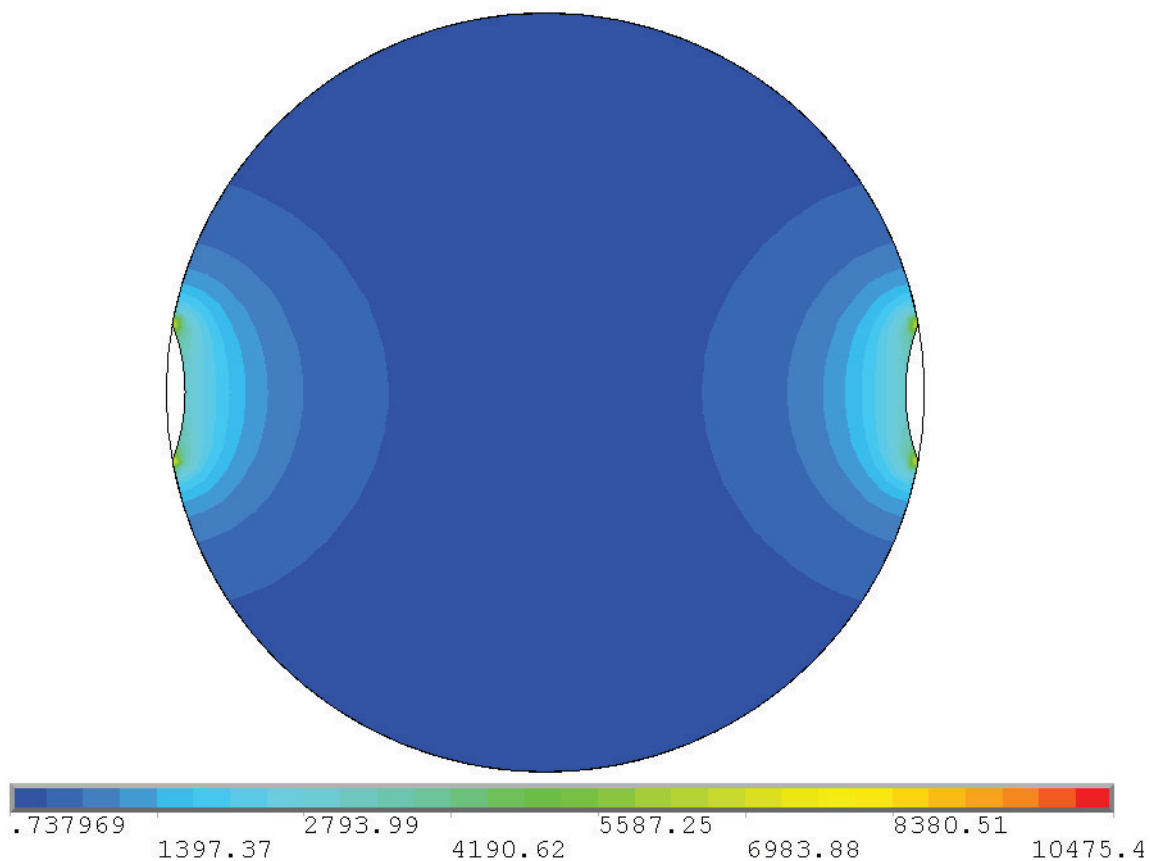
Obr. 5.10 Numerický model a diskretizační síť pro výpočet rozložení hustoty virtuálního proudu - rovina řezu $xy, z = 0$

Numerický model, vytvořený formou skriptu s příkazy jazyku APDL, se skládá z dvojice elektrod tvaru kulové výseče a průtočného objemu měřicí trubice (Obr. 5.10). Do jedné z elektrod byl injektován proud jednotkové velikosti, na druhé elektrodě byl nastaven nulový potenciál. Na celé hraniční oblasti (vyjma povrchu elektrod) byla aplikována nulová Neumannova okrajová podmínka ($\partial\varphi/\partial n = 0$).

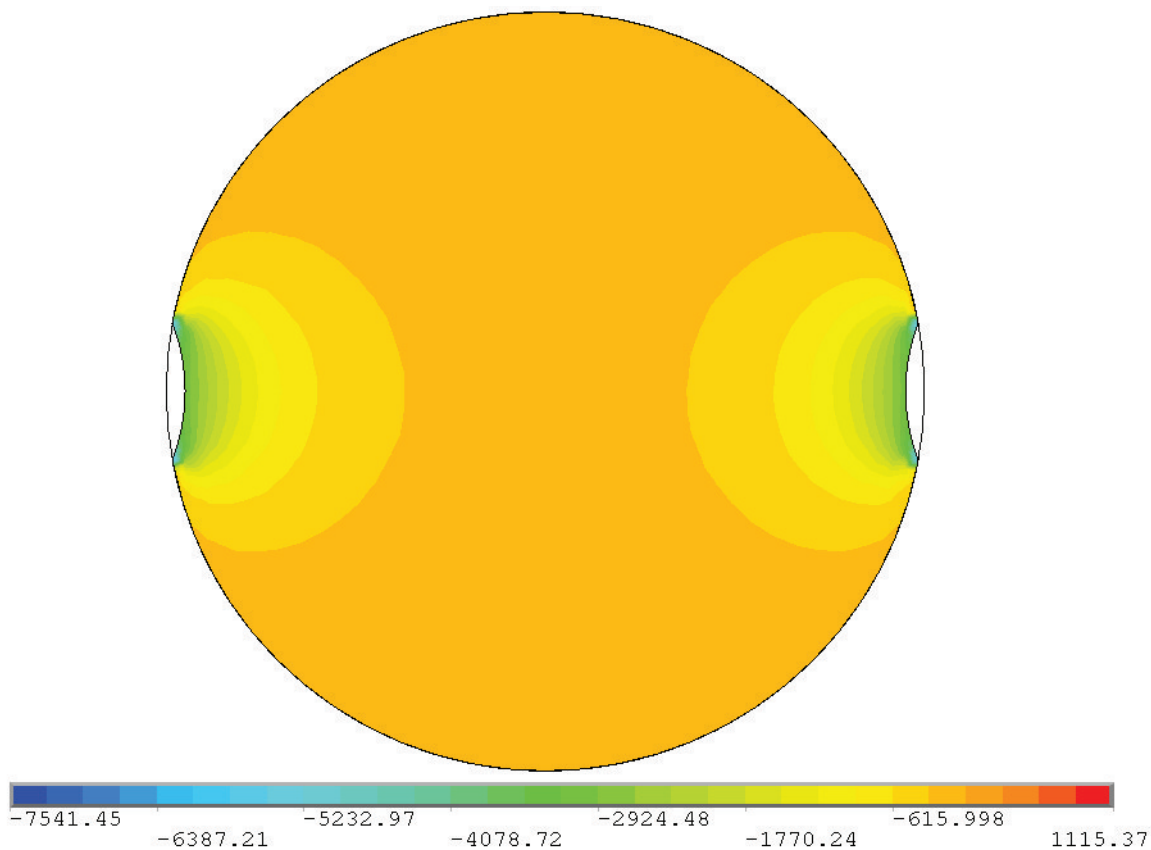
Numerická simulace byla provedena pro jednotkovou el. vodivost (resp. rezistivitu) všech podoblastí, a tedy výsledné rozložení proudové hustoty virtuálního proudu odpovídá přímo el. intenzitě pole. Na následující straně jsou uvedeny grafické výsledky v průtočném průřezu čidla (rovina řezu $xy, z = 0$), získané pro diskretizační síť o 162 322 uzlech a 94 719 elementech (další obrázky viz příloha č.9).



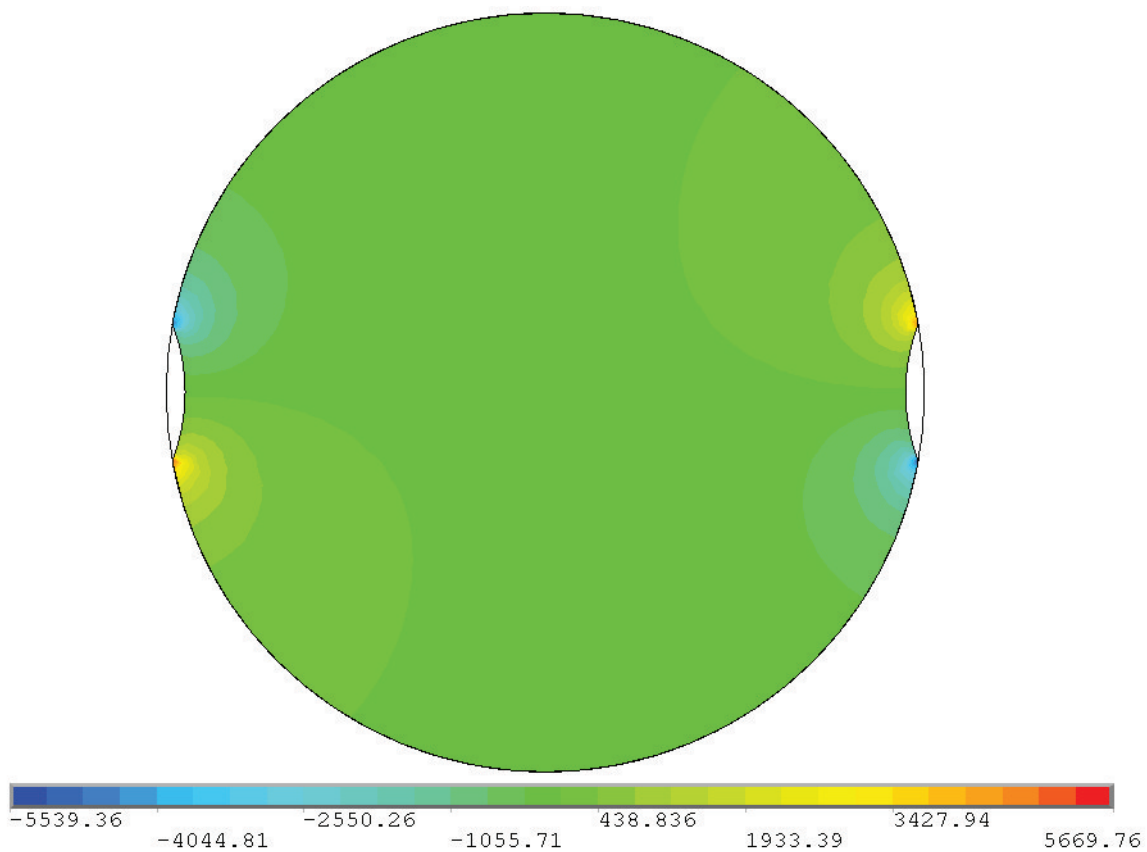
Obr. 5.11 Rozložení el. potenciálu φ [V] v průtočném průřezu čidla - rovina řezu xy , $z = 0$



Obr. 5.12 Rozložení hustoty virtuálního proudu J [$A \cdot m^{-2}$] v průtočném průřezu čidla - rovina řezu xy , $z = 0$

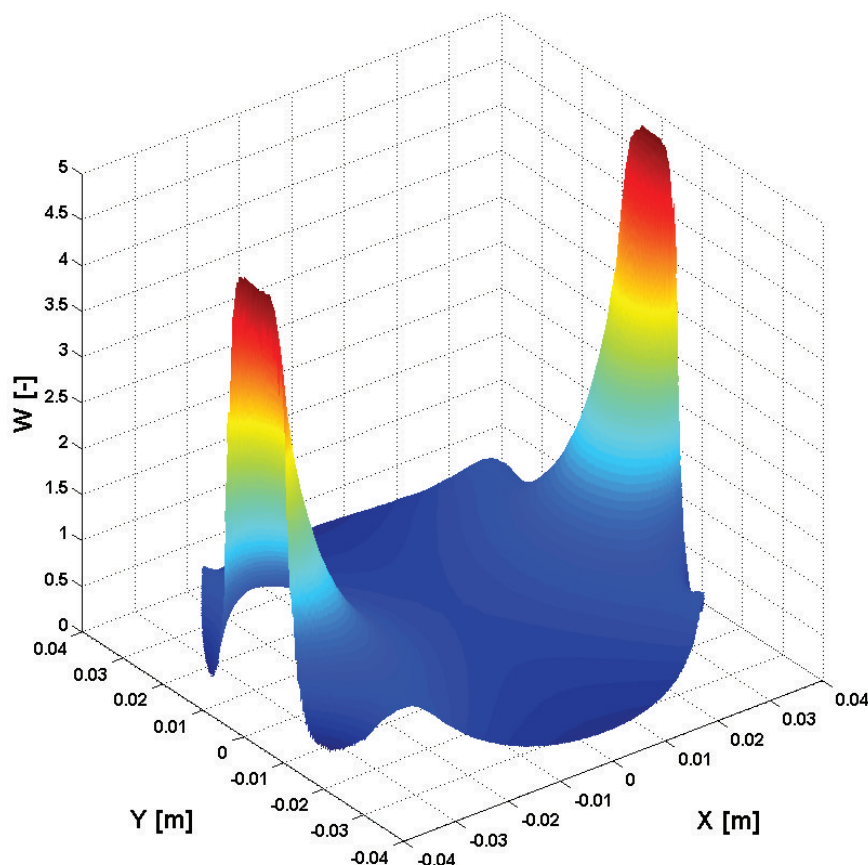


Obr. 5.13 Rozložení x-ové složky hustoty virtuálního proudu v průřezném průřezu čidla - rovina řezu xy , $z=0$



Obr. 5.14 Rozložení y-ové složky hustoty virtuálního proudu v průřezném průřezu čidla - rovina řezu xy , $z=0$

Numerická data pro hustotu virtuálního proudu z průtočného průřezu byla exportována do textového souboru a následně (spolu s daty pro mag. pole varianty čidla s VMO) načtena ve výpočetním prostředí Matlab, ve kterém proběhlo dopočtení váhové funkce na základě vztahu (5.13). Výsledné rozložení váhových koeficientů ilustruje Obr. 5.15.



Obr. 5.15 Metoda virtuálního proudu - prostorové rozložení koeficientů váhové funkce v průtočném průřezu čidla, respektovány obě složky mag. indukce, $W_z = fce(x,y)$, varianta s VMO

Z Obr. 5.15 a z rozložení složek $j_{vx}(x,y)$ a $j_{vy}(x,y)$ proudové hustoty virtuálního proudu (Obr. 5.14 a Obr. 5.13) je zřejmá shoda se Schercliffovo teorií - v blízkosti elektrod vykazuje čidlo zvýšenou citlivost, mimo elektrody je čidlo naopak méně citlivé (koeficienty < 1). Výsledná váhová funkce a její složky mají podobné průběhy jako výše uvedená analytická vyjádření. Do určité míry se na velikosti váhových koeficientů projevuje vliv větší mag. indukce na okrajích pólových nástavců.

Integrací součinu $v_z(x,y) \cdot W_z(x,y)$ přes plochu průtočného průřezu (při laminárním rychlostním profilu) vyšla hodnota indukovaného napětí o velikosti 2,176 mV, tj. o celý řád větší než výsledky získané řešením Poissonovy rovnice (5.3). Napětí se řádově lišilo i pro případ numerického modelu s bodovými elektrodami. Rozdíl je způsoben velkými funkčními hodnotami složek proudové hustoty virtuálního proudu.

Velikost složek $j_{vx}(x, y)$ a $j_{vy}(x, y)$ váhové funkce $W_z(x, y)$ je značně závislá na hustotě diskretizační sítě v blízkosti snímacích elektrod, kde se nacházejí největší gradienty el. potenciálu. Hustota sítě tak přímo ovlivňuje velikost váhových koeficientů, a tedy i celkovou hodnotu indukovaného napětí. Nicméně nemělo by se jednat o hlavní faktor velkého rozdílu v obdržených výsledcích.

Pro dosažení korektních hodnot indukovaného napětí, by bylo nutné provést integraci přes celý objem měřicí trubice, to by však vyžadovalo zcela jiný přístup řešení, např. v programu Ansys Fluent, který obsahuje nástroje k modelování proudění, a který umožňuje řešit multi-fyzikální úlohy, jako jsou Poissonova rovnice (5.3), resp. Bevirova metoda virtuálního proudu. V úvahu by též připadal již zmíněný program Comsol Multiphysics. Avšak z časových důvodů, již nebylo možné v rámci diplomové práce tyto 3D numerické simulace uskutečnit.

5.5.3 Výpočet indukovaného el. napětí pomocí analytické váhové funkce

Pro ověření 2D numerických výsledků, získaných přímým řešením Poissonovy rovnice (5.3) pro čidlo s bodovými elektrodami, byl tedy v programu Matlab ještě vytvořen skript pro výpočet indukovaného el. napětí z analyticky zadané váhové funkce. Z důvodu snazší numerické integrace bylo použito analytické řešení pro kartézské souřadnice uvedené v odborném článku [9] a nikoliv řešení (5.8) vyjádřené v polárních souřadnicích.

$$\Delta U = \Delta\varphi = \frac{2}{\pi R} \iint_{S_D} v_z(x, y) \cdot (B_x \cdot j_{vy} - B_y \cdot j_{vx}) dx dy \quad (5.14)$$

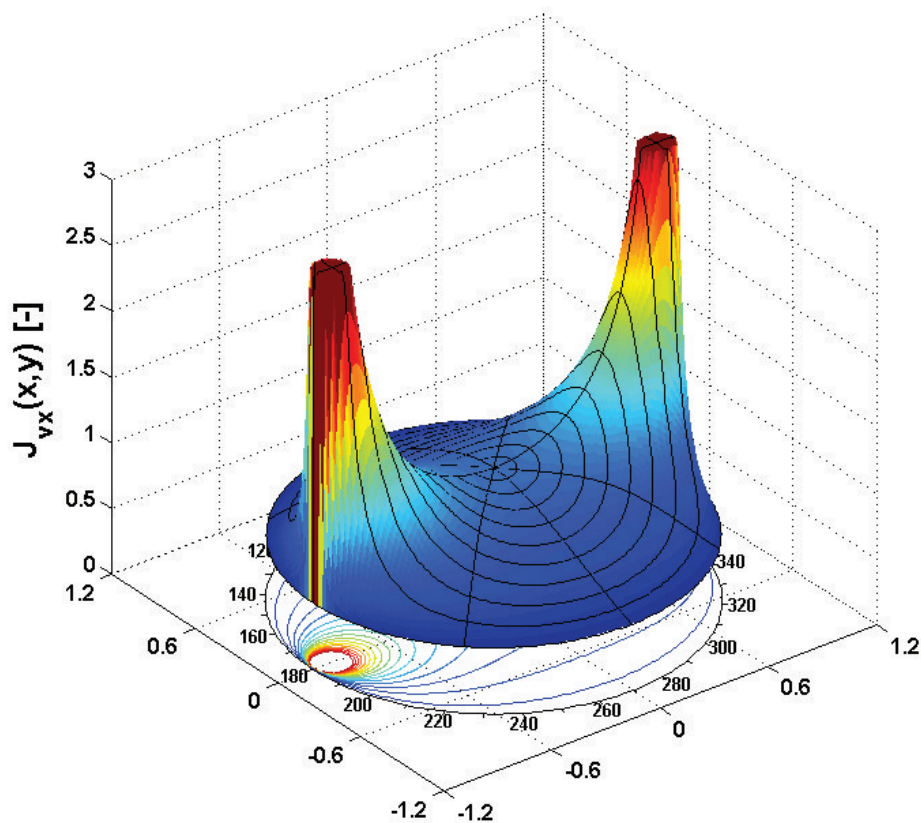
Matematické vyjádření váhové funkce $W_z(x, y)$ včetně složek hustoty virtuálního proudu:

$$W_z(x, y) = \frac{2}{\pi R} \cdot (B_x \cdot j_{vy} - B_y \cdot j_{vx})$$

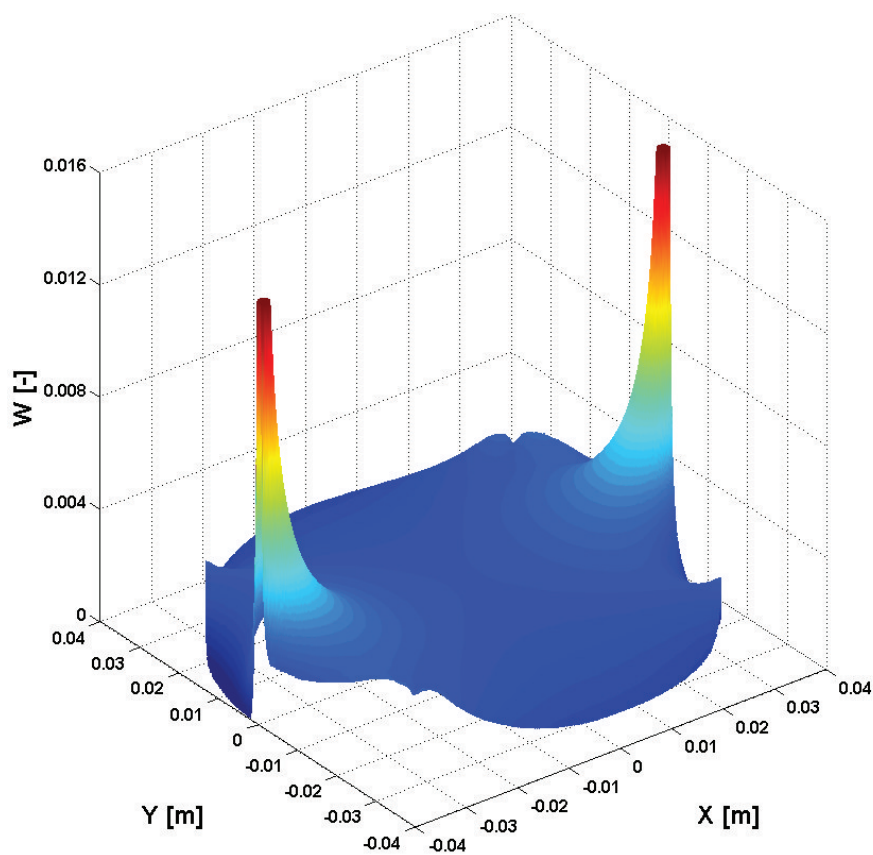
$$j_{vx}(x, y) = \frac{-R^2(R^2 + y^2 - x^2)}{R^4 + 2R^2(y^2 - x^2) + (x^2 + y^2)^2} \quad (5.15)$$

$$j_{vy}(x, y) = \frac{2R^2xy}{R^4 + 2R^2(y^2 - x^2) + (x^2 + y^2)^2}$$

Složky $j_{vx}(x, y)$ a $j_{vy}(x, y)$ mají identický průběh jako složky váhové funkce (5.9). Rozložení koeficientů x-ové složky ilustruje Obr. 5.16 na následující straně.



Obr. 5.16 Rozložení váhových koeficientů složky $j_{vx}(x, y)$ analytické váhové funkce (5.15)



Obr. 5.17 Prostorové rozložení koeficientů váhové funkce (5.15) v průtočném průřezu čidla - $W_z = fce(x,y)$, respektovány obě složky mag. indukce, varianta s VMO

Na Obr. 5.17 je uvedena výsledná analytická váhové funkce $W_z(x, y)$, roznásobená složkami mag. indukce. Oproti váhové funkci určené metodou virtuálního proudu (Obr. 5.15) nabývají její koeficienty výrazně nižších hodnot, a proto i plošná integrace součinu $v_z(x, y) \cdot W_z(x, y)$ přes plochu průtočného průřezu vede na menší indukovaná napětí na snímacích elektrodách, viz Tab. 5.1. Potvrdil se poměrně malý vliv x-ové složky mag. pole, kterou bylo možné opět při výpočtech zanedbat. Negativní vliv součinu $B_x \cdot j_{vy}$ na zvýšenou citlivost čidla je kompenzován nízkými hodnotami x-ové složky mag. indukce v oblasti elektrod a malými hodnotami koeficientů složky $j_{vy}(x, y)$ mimo elektrody.

Rychlostní profil $\bar{V} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Laminární	Turbulentní	Asymetrický
Poissonova rovnice	0,147 mV	0,141 mV	0,214 mV
Váhová funkce	0,148 mV	0,156 mV	0,218 mV

Tab. 5.1 Porovnání numerických výsledků pro indukované el. napětí - varianta čidla s VMO, bodové elektrody, respektována pouze y-ová složka mag. indukce

Hodnoty indukovaných napětí z Tab. 5.1. jsou v souladu s výsledky obdrženy na základě přímého řešení Poissonovy rovnice (5.3), potvrzují se tak poznatky o citlivosti čidla na různé rychlostní profily, získané simulacemi v programu Ansys (podkap. 5.3 a 5.4) a rozborem analytické váhové funkce z podkap. 5.5.

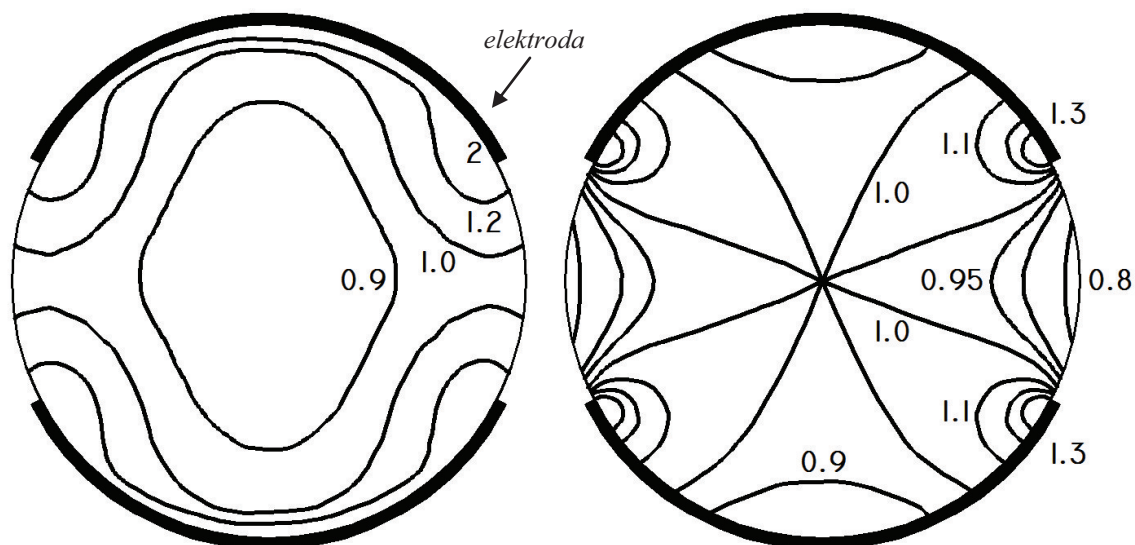
5.6 VYHODNOCENÍ SUCHÉ KALIBRACE ČIDLA DN80

Numerické výpočty provedené v rámci této kapitoly ukázaly možné způsoby analýzy indukovaného napětí na snímacích elektrodách čidla indukčního průtokoměru. Ačkoliv nebyly aplikovány optimální metody řešení této multi-fyzikální problematiky, lze konstatovat, že obdržené výsledky charakterizují reálné chování čidla. Nevýhodou provedených výpočtů je předpoklad bodových elektrod a také omezení řešení pouze na průtočný průřez měřicí trubice (tj. respektování pouze dvou dimenzí.)

Jako efektivnější se jeví metoda váhové funkce (WFM), která popisuje přímou vazbu indukovaného napětí na rychlostní profil kapaliny a konstrukční uspořádání čidla skrze váhové koeficienty. V mnoha odborných publikacích jsou uvedeny různé konstrukční úpravy, které vedou na snížení citlivosti na asymetrické rychlostní profily (též např. ke zvýšení poměru signál/šum). Optimalizací mag. obvodu (resp. mag. pole v objemu měřicí trubice), či úpravou elektrodového systému lze docílit téměř homogenní váhové

funkce. Příkladem takové konstrukční úpravy jsou čidla se snímacími elektrodami o velké ploše. Rozložení váhových koeficientů těchto čidel znázorňuje Obr. 5.18.

Přímé řešení Poissonovy rovnice (5.3) ve třech dimenzích např. v programu Ansys Fluent by nemělo představovat zásadní problém, avšak otázkou zůstává formulace smíšených okrajových podmínek pro případ snímacích elektrod se skutečnými rozměry. Pravděpodobně by bylo možné numerickou analýzu provést pouze pro bodové elektrody.



Obr. 5.18 Izolinie váhových funkcí čidel s velkými elektrodami - (O'Sullivan, 1983, Cox a Waytt, 1984) [8]

Pro "suchou kalibraci" čidla je tedy nejvýhodnější Bevirova metoda virtuálního proudu, protože umožňuje respektovat skutečný tvar snímacích elektrod a při numerickém řešení Laplaceovy rovnice (5.11) snadno zformulovat příslušné okrajové podmínky. Předpokladem aplikace Bevirovy metody je však zvládnutí multi-fyzikálního numerického algoritmu, který by vedl na výsledky srovnatelné s experimentálním měřením na kalibrační trati. Některé zahraniční odborné články s touto problematikou ukazují, že numerický algoritmus suché kalibrace je možné vytvořit (i bylo dosaženo shody s experimenty), nicméně případné další studium těchto článků již přesahuje rámec této diplomové práce.

ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byla provedena numerická analýza čidla indukčního měřiče průtoku v profesionálním MKP programu Ansys Multiphysics. Nejdříve byl zformulován a následně vyřešen numerický 3D model varianty čidla s válcovými cívkami a vnitřním magnetickým obvodem (tj. s feromagnetickými prvky). Numerický model byl vytvořen parametricky, formou programového skriptu s příkazy jazyku APDL. V diplomové práci jsou uvedeny též dvě odlišné konstrukční varianty, konkrétně čidlo s vnějším magnetickým obvodem a čidlo se sedlovými cívkami bez feromagnetických částí. Kromě magnetického pole byla předmětem numerické analýzy též "suchá kalibrace" čidla, v rámci které byly aplikovány základní poznatky z teorie indukčních průtokoměrů pro výpočet velikosti indukovaného napětí na snímacích elektrodách.

Na základě MKP simulací trojdimenzionálního stacionárního magnetického pole jednotlivých variant čidla bylo možné dospět k několika důležitým poznatkům. Předně feromagnetické prvky (pólové nástavce, jádra, pláště) umožňují významně redukovat rozměry budících cívek, a tak uspořit značné množství drahé mědi potřebné k jejich výrobě a zároveň dosáhnout snížení celkového příkonu indukčního průtokoměru. Dalším významným přínosem feromagnetických prvků, zejména pólových nástavců, je možnost prostřednictvím jejich geometrické konfigurace "řídít" rozložení magnetického pole v oblasti měření. Výhodou je také snazší a přesnější výroba válcových budících cívek.

Jako nejlepší konfigurace čidla se jeví varianta s vnějším mag. obvodem, u které bylo dosaženo díky absenci vnitřního feromag. pláště největší úspory materiálu, a při stejném magnetomotorickém napětí cívek také největších hodnot mag. indukce na spojnicích mezi elektrodami. Nevyřešenou otázkou zůstává, zdali by čidlo bylo elektromagneticky kompatibilní se svým bezprostředním okolím, neboť jeho mag. pole není stíněno (mag. tok se uzavírá skrze feromag. části původně tvořící stínění).

U konstrukčních variant čidla s feromagnetickými prvky může mít negativní vliv na jejich chod případná remanence použité oceli, neboť cívky jsou buzeny impulzně proudy opačných polarit. Pokud by remanence příliš ovlivňovala mag. pole čidla, bylo by možné aplikovat magneticky měkčí materiál (tj. materiál s užší hysterezní smyčkou), např. typu permalloy. Tím by se však podstatně navýšila cena výsledné konstrukce.

"Suchá kalibrace" čidla ukázala, že údaj o objemovém průtoku je citlivý na asymetrické rychlostní profily měřené kapaliny, neboť vypočítaná velikost indukovaného napětí se výrazně lišila oproti hodnotám pro laminární a turbulentní (osově symetrický) rychlostní profil o stejné střední rychlosti proudění. Tento negativní atribut čidla byl vysvětlen na základě teoretického rozboru Shercliffovy váhové funkce jako důsledek zvýšených váhových koeficientů v oblasti snímacích elektrod a potvrzen shodou numerických výsledků získaných jednak přímým řešením Poissonovy rovnice pro el. potenciál a jednak prostřednictvím výpočtu analyticky zadané váhové funkce.

Na teoretické výsledky diplomové práce by bylo vhodné navázat konstrukcí skutečného prototypu čidla s následným experimentálním ověřením rozložení mag. pole v průtočném objemu měřicí trubice, např. měřením velikosti mag. indukce pomocí Hallovy sondy. Čidlo by mělo být též otestováno na vnější rušivá mag. pole, např. přiložením permanentního magnetu k feromag. plášti, případně jeho vložení do magnetického pole jedno-závitové cívky. Pro experimentální ověření by bylo možné využít i již zkonstruované čidlo jiné konfigurace magnetického obvodu, neboť navržený numerický 3D model pro program Ansys je univerzální a díky skriptům s příkazy parametrického jazyku APDL i poměrně snadno modifikovatelný.

Případný prototyp čidla (opatřený řídicí elektronikou) by bylo nutné dále testovat na zkušební kalibrační trati, a to v několika bodech požadovaného rozsahu měření průtoku a také pro různé provozní stavy, které mohou při reálném provozu čidla běžně nastat. Experimentální výsledky ze zkušební trati by pak bylo možné využít pro revizi numerických výsledků "suché kalibrace", jejíž multi-fyzikální charakter by mohl být předmětem dalšího rozšíření poznatků uvedených v této diplomové práci. Konkrétně by bylo vhodné vytvořit korektní 3D numerický výpočetní model Bevirovy metody virtuálního proudu (např. v programu Ansys Fluent, eventuálně v programu Comsol Multiphysics).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Baker R. C., Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance and Applications. University of Cambridge, 2000, ISBN 978052101765
- [2] Bejček L., Ďaďo S., Platil A.: Měření průtoku a výšky hladiny. BEN - technická literatura, 2005, ISBN 80-7300-156-X
- [3] Bevir M. K.: Theory of Induced Voltage Electromagnetic Flowmeasurement. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 6, pp. 315-320, 1970
- [4] Fraden J.: Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications. Birkhäuser, 2004
- [5] Gyimesi M., Lavers J. D.: Generalized Potential Formulation for 3-D Magnetostatic Problems. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 28, no. 4, pp. 1924-1929
- [6] Kadlec K.: Snímače průtoku - principy, vlastnosti a použití. Automa, č.10-12, 2006
- [7] Jenčík J.: Principy měření průtoku. Automa, č.2, 2002
- [8] Leeuwen M. B. van: Electromagnetic Flowmeters. Master of Science Thesis, Eindhoven University of Technology, 1997
- [9] Lim W. K., Chung K. M.: Relative errors in evaluating the electromagnetic flowmeter signal using the weight function method and the finite volume method. Flow Measurement and Instrumentation 9, pp. 229-235, 1998
- [10] Mayer D., Polák J.: Metody řešení elektrických a magnetických polí. SNTL/ALFA, Praha, 1983
- [11] Mayer D.: Teorie elektromagnetického pole, 1. díl. Západočeská univerzita v Plzni, 2004, ISBN 80-7082-826-9
- [12] Ripka P., Típek A.: Modern Sensors Handbook. ISTE, 2007, ISBN 1905209665
- [13] Shercliff J. A.: The Theory of Electromagnetic Flow-Measurement. Cambridge University Press, London, 1962
- [14] Shercliff J. A.: Relation between the Velocity Profile and the Sensitivity of Electromagnetic Flowmeters. Journal of Applied Physics, vol.25, pp. 817-818, 1954

INTERNETOVÉ ODKAZY

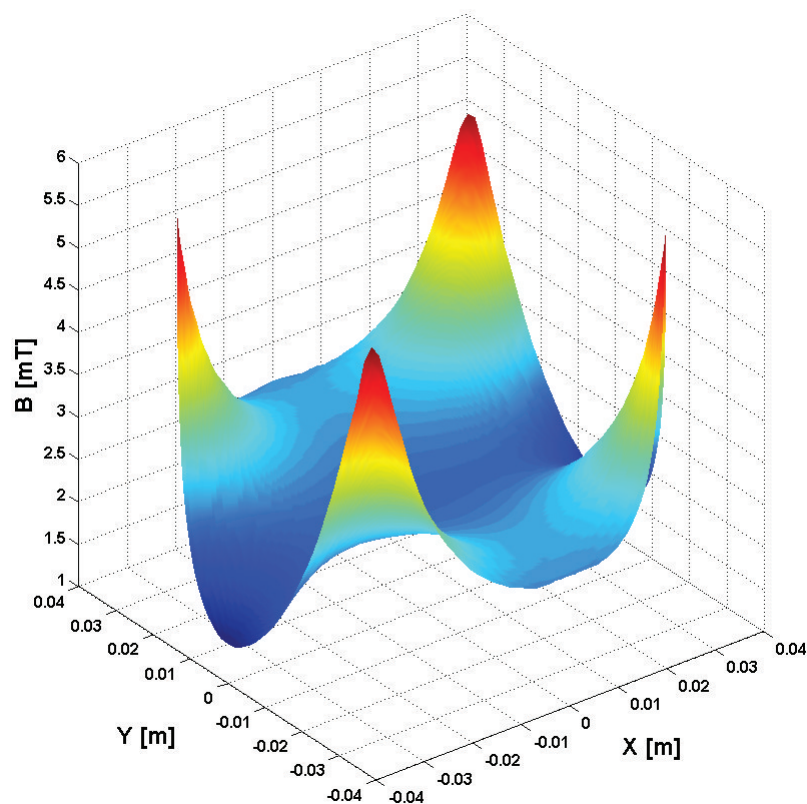
- [15] <http://www.directindustry.com> citováno dne 10.2.2012
- [16] <http://www.prisma-instruments.com> citováno dne 15.2.2012
- [17] <http://www.eletta.com> citováno dne 15.2.2012
- [18] <http://www.bluwhite.com> citováno dne 15.2.2012
- [19] <http://www.omega.com> citováno dne 15.2.2012
- [20] <http://www.bronkhorst.com> citováno dne 25.2.2012
- [21] <http://www.directindustry.com> citováno dne 25.2.2012
- [22] <http://www.proconsystems.com> citováno dne 25.2.2012
- [23] <http://krohne.com> citováno dne 29.2.2012
- [24] <http://www.elis.cz> citováno dne 29.2.2012
- [25] <http://www.automation.siemens.com> citováno dne 29.2.2012
- [26] <http://ww2.cinteg.de> citováno dne 11.4.2012

SEZNAM PŘÍLOH K DIPLOMOVÉ PRÁCI

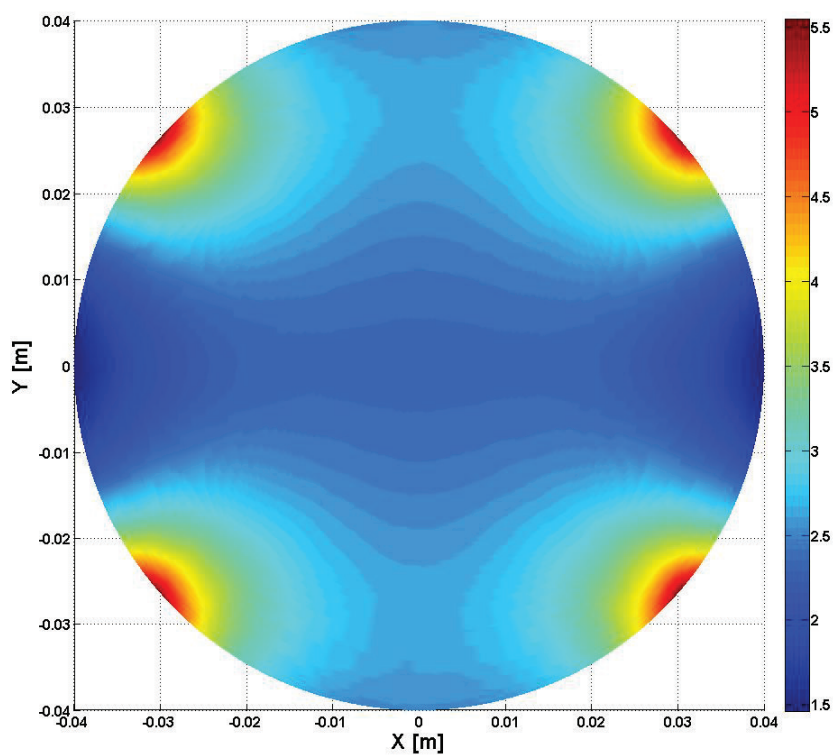
Příloha č.1	Grafické rozložení mag. indukce v průtočném průřezu čidla DN80 s vnitřním mag. obvodem - rovina řezu xy, z = 0.....	- 1 -
Příloha č.2	Grafické rozložení mag. indukce v průtočném průřezu čidla DN80 se sedlovými budičími cívkami - rovina řezu xy, z = 0	- 3 -
Příloha č.3	Obrázky mapující rozložení mag. pole čidla DN80 se sedlovými cívkami	- 5 -
Příloha č.4	Programový skript s příkazy jazyku APDL pro numerickou analýzu stacionárního mag. pole čidla DN80 s vnitřním mag. obvodem.....	- 7 -
Příloha č.5	Programový skript s příkazy jazyku APDL pro uložení vypočtených hodnot mag. indukce do textového souboru.....	- 11 -
Příloha č.6	Grafické rozložení el. potenciálu v průtočném průřezu čidla DN80 při respektování y-ové složky mag. indukce - varianta s VMO.....	- 14 -
Příloha č.7	Ansys - rozložení el. potenciálu v průtočném průřezu čidla DN80 při respektování x-ové a y-ové složky mag. indukce - varianta s VMO.....	- 15 -
Příloha č.8	Prostorové rozložení váhové funkce (5.9) při respektování pouze x-ové složky mag. indukce - výpočet při $B_x(r,\varphi) = 1 \text{ T}$, $W = fce(r,\varphi)$	- 16 -
Příloha č.9	Metoda virtuálního proudu - grafické výsledky z programu Ansys.....	- 17 -
Příloha č.10	CAD model čidla DN80 s vnitřním mag. obvodem - SolidWorks 2010.....	- 18 -
Příloha č.11	CAD model čidla DN80 se sedlovými cívkami - SolidWorks 2010.....	- 20 -
Příloha č.12	Technický výkres vnitřního magnetického obvodu čidla DN80.....	- 22 -
Příloha č.13	Technický výkres sedlové cívky čidla DN80.....	- 23 -
Příloha č.14	Technický výkres feromagnetického stínění čidla DN80	- 24 -

Součástí přílohy k diplomové práci je též nosič DVD, který se nalézá na zadní straně desek. DVD obsahuje datové soubory a skripty pro programy Ansys a Matlab, dále elektronickou verzi DP, CAD modely a technické výkresy analyzovaného čidla DN80.

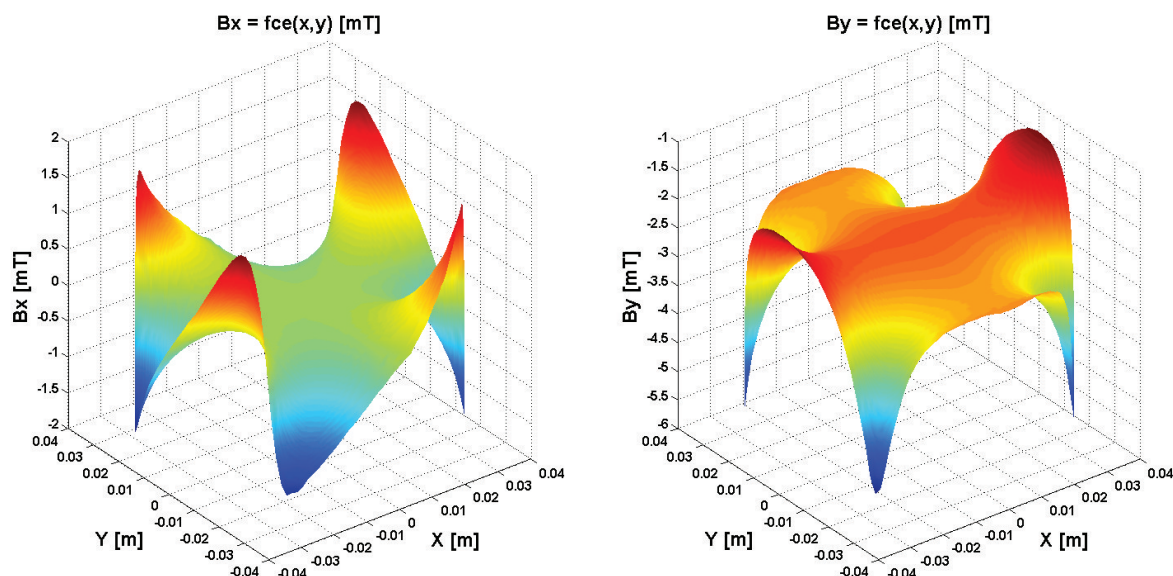
Příloha č.1 Grafické rozložení mag. indukce v průřezném průřezu čidla DN80 s vnitřním mag. obvodem - rovina řezu xy, z = 0



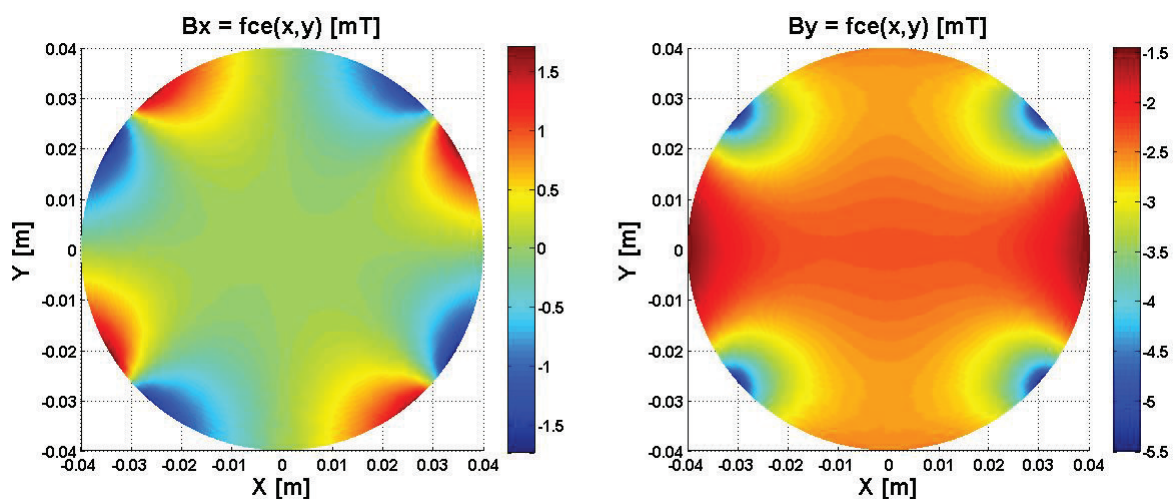
Obr. č.1 Prostorové rozložení celkové mag. indukce B [mT] v průřezném průřezu čidla - $B = fce(x,y)$



Obr. č.2 Grafické rozložení mag. indukce B [mT] v průřezném průřezu čidla - $B = fce(x,y)$ - rovina xy

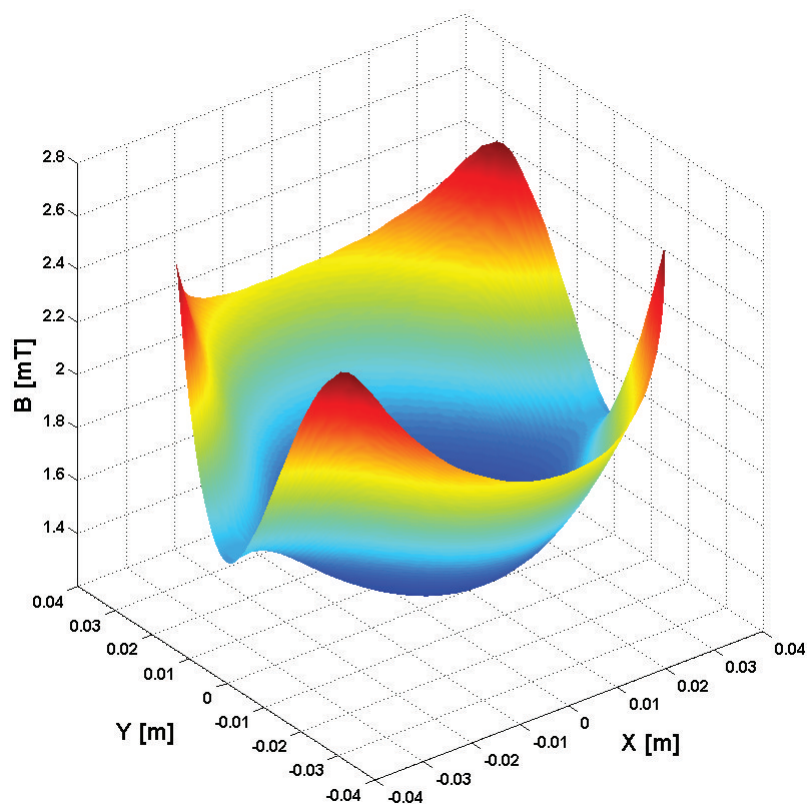


Obr. č.3 Prostorové rozložení x-ové a y-ové složky mag. indukce v průtočném průřezu čidla

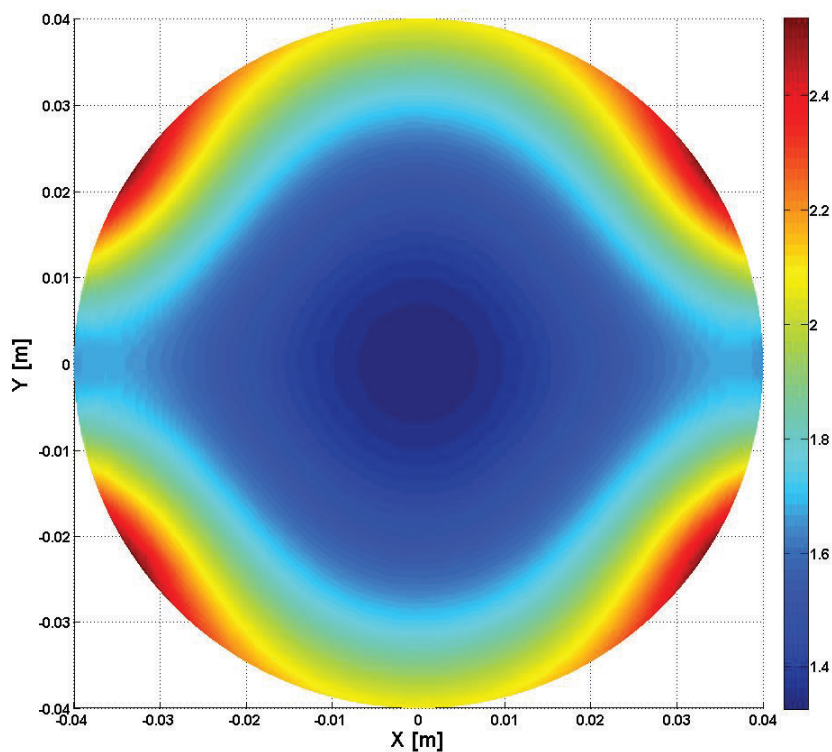


Obr. č.4 Grafické rozložení x-ové a y-ové složky mag. indukce v průtočném průřezu čidla - rovina xy

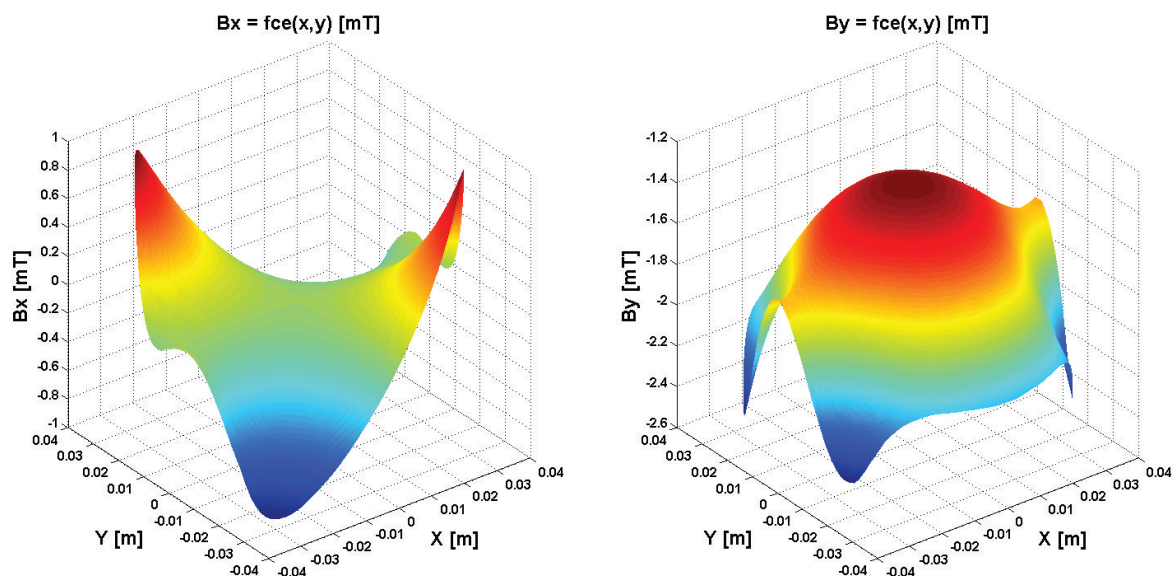
Příloha č.2 Grafické rozložení mag. indukce v průtočném průřezu čidla DN80 se sedlovými budicími cívkami - rovina řezu $xy, z = 0$



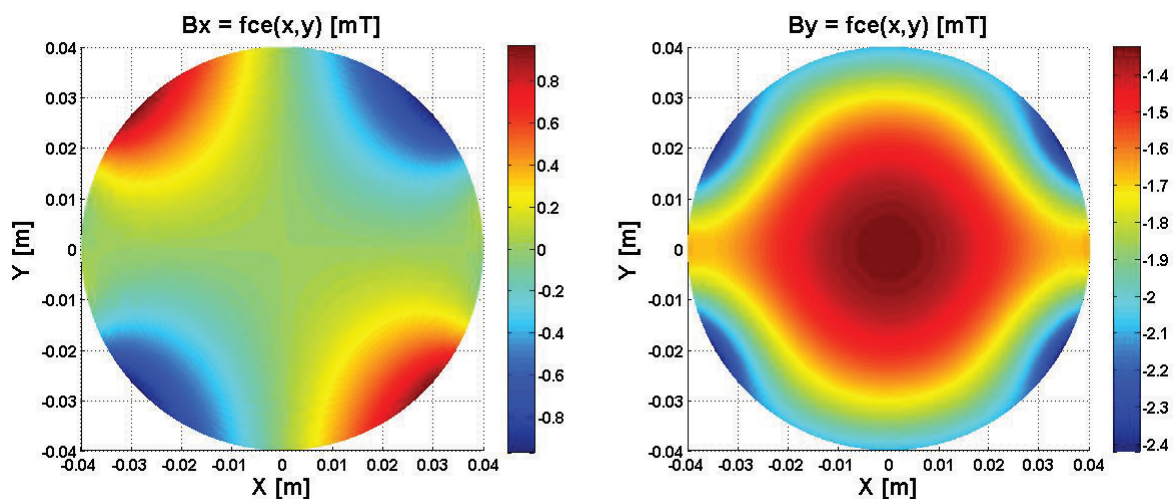
Obr. č.5 Prostorové rozložení celkové mag. indukce B [mT] v průtočném průřezu čidla - $B = fce(x,y)$



Obr. č.6 Grafické rozložení mag. indukce B [mT] v průtočném průřezu čidla - $B = fce(x,y)$ - rovina xy

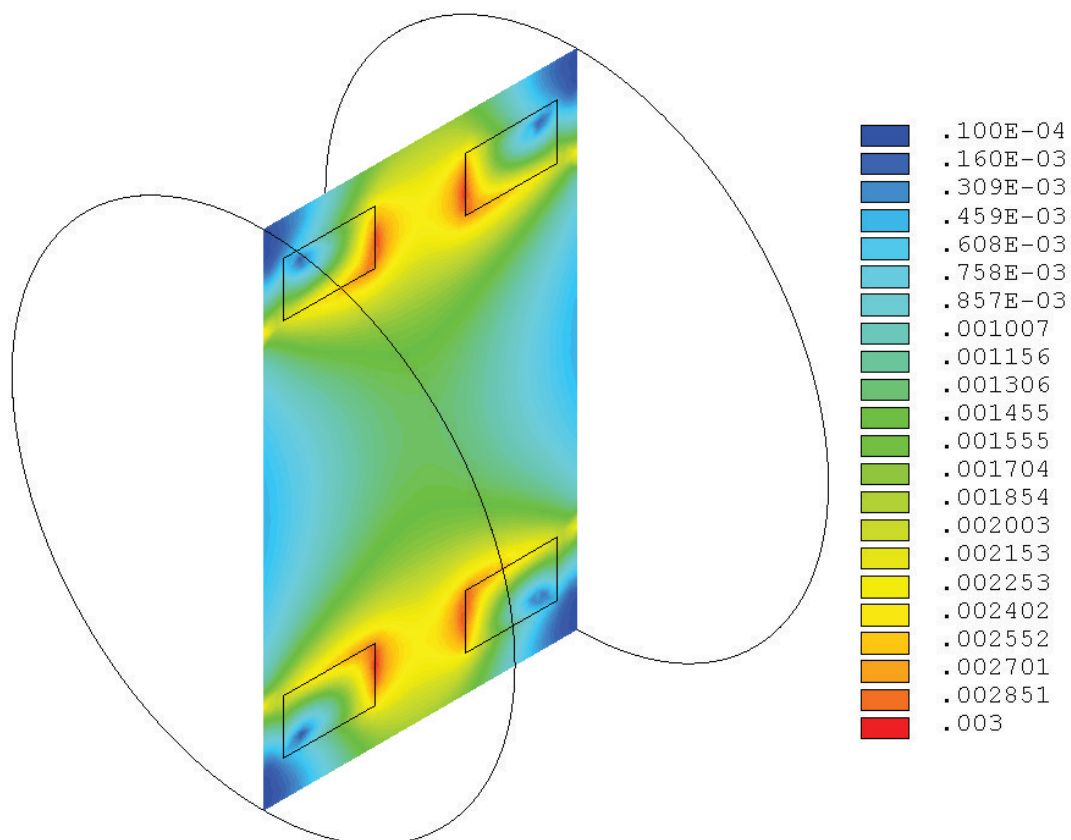
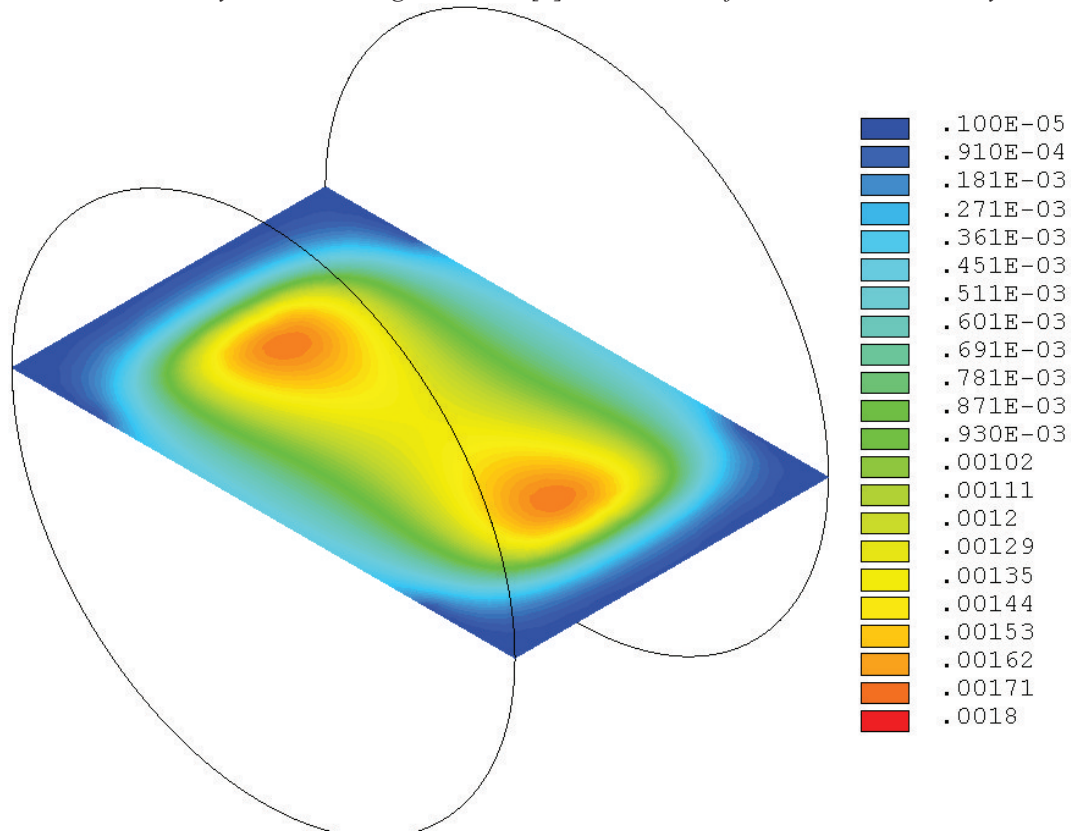


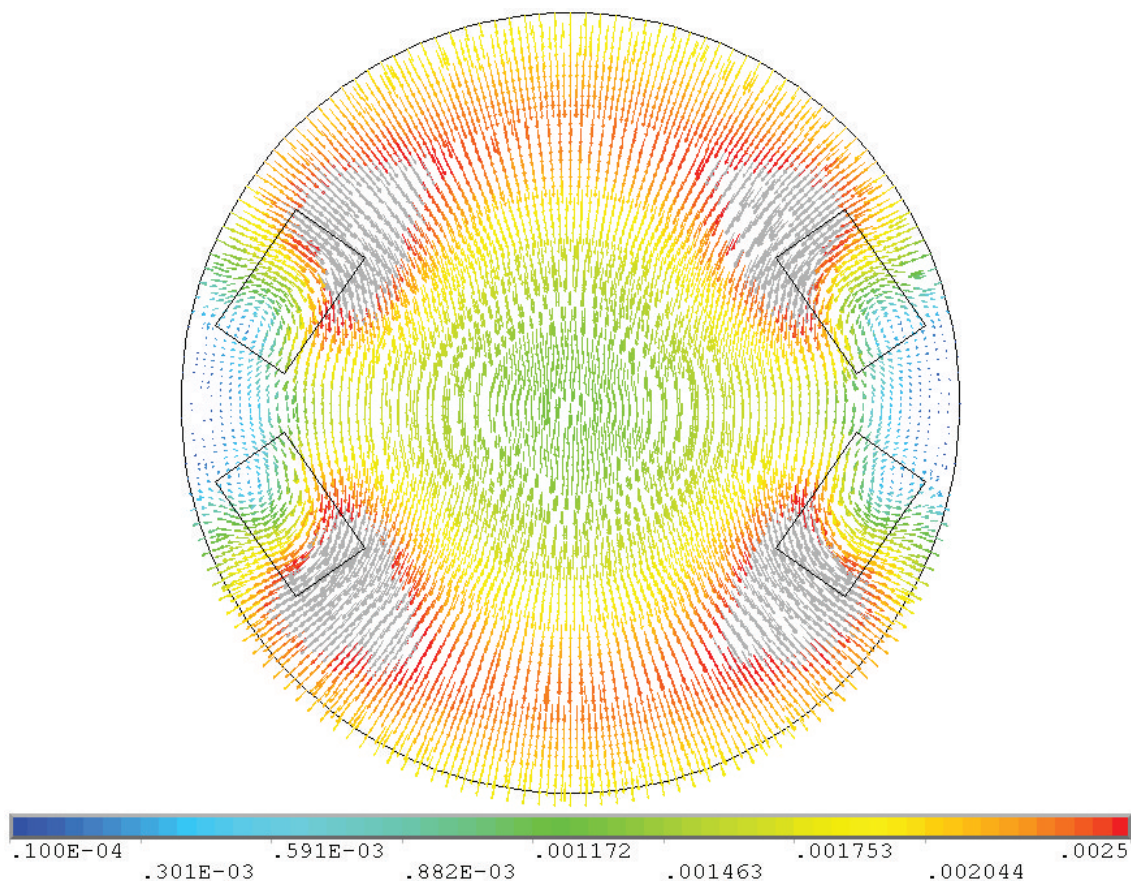
Obr. č.7 Prostorové rozložení x-ové a y-ové složky mag. indukce v průřezném průřezu čidla



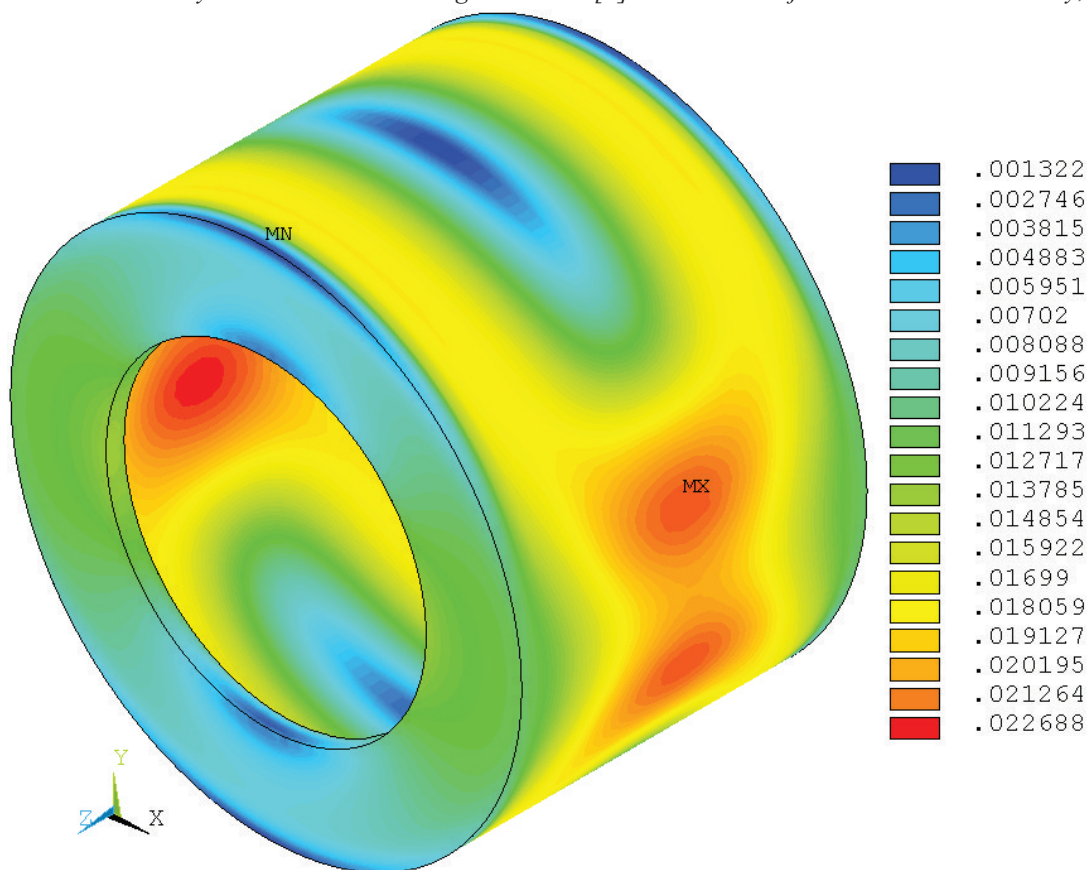
Obr. č.8 Grafické rozložení x-ové a y-ové složky mag. indukce v průřezném průřezu čidla - rovina xy

Příloha č.3 Obrázky mapující rozložení mag. pole čidla DN80 se sedlovými cívkami

Obr. č.9 Sedlové cívky - rozložení mag. indukce B [T] ve vnitřním objemu čidla - rovina řezu yz , $x = 0$ Obr. č.10 Sedlové cívky - rozložení mag. indukce B [T] ve vnitřním objemu čidla - rovina řezu xz , $y = 0$



Obr. č.11 Sedlové cívky - rozložení vektorů mag. indukce B [T] ve vnitřním objemu čidla - rovina řezu xy , $z=0$



Obr. č.12 Sedlové cívky - rozložení mag. indukce B [T] ve feromagnetickém stínění

Příloha č.4 Programový skript s příkazy jazyku APDL pro numerickou analýzu stacionárního mag. pole čidla DN80 s vnitřním mag. obvodem

```

!*****
!* NUMERICKY MODEL CIDLA INDUKCNÍHO MĚŘIČE PRŮTOKU S POLOVÝMI NASTAVCI *
!*
!*           A S VNITRNÍM MAGNETICKÝM OBVODEM
!*
!*          VÝPOČET ROZLOŽENÍ STACIONÁRNÍHO MAGNETICKÉHO POLE CIDLA DN80
!******

! ***** = znací řádek, pod kterým se nacházejí skalární parametry, které je možné
!           modifikovat a měnit tak plynule numerický model

! ##### = znací přebytečný kód, který je možné ze skriptu odstranit

! !!!!! = znací varování či poznámku související s vytvořením numerického modelu

FINISH
/CLEAR,START

! název souboru
/FILENAME,CIDLO_DN80_S_VMO,0

! nastavení jednotek SI
/UNITS,SI

! zobrazovaný titulěk
/TITLE,CIDLO_DN80_S_VMO

!
/_____/
/PREP7           ! spuštění preprocesoru

! definování potřebných elementů
ET,1,SOLID96     ! element pro řešení stacionárního mag. pole

ET,2,MESH200,6  ! element pro sweepování síťe, 6 - volba quad elementu se 4 uzly

! 3.a 4. element tvoří SOURC36, který slouží k vytvoření geometrie budících cívek
! 3 - vrchní (TOP) cívka, 4 - spodní (BOTTOM) budící cívka

! !!!!! makro RACE automaticky přiřazuje cívkám nejbližší volné identifikační ...
! ... číslo elementu SOURC36

!
/_____/
! MATERIALOVE PARAMETRY

TB,BH,1         ! definice BH křivky pro feromag. obvod průtokoměru - materiál 1

! definice jednotlivých bodů BH křivky - konstrukční ocel 11 373
TBPT,DEFI,80,.58
TBPT,DEFI,200,.92
TBPT,DEFI,800,1.23
TBPT,DEFI,1600,1.345
TBPT,DEFI,2500,1.45
TBPT,DEFI,5000,1.62
TBPT,DEFI,10e3,1.75
TBPT,DEFI,15e3,1.835
TBPT,DEFI,20e3,1.95

MP,MURX,2,1     ! nastavení rel. permeability pro všechny ostatní oblasti - mat. 2

!
/_____/
! VYTVORENÍ BUDÍCÍCH CÍVEK CIDLA INDUKCNÍHO PRŮTOKOMĚRU - aplikace makra RACE

! !!!!! makro RACE orientuje axiální osu vytvořené proudovodice podle osy z ...
! ... pro orientaci podle osy y je potřeba změnit osy pracovní roviny ...
! ... (working plane - WP)

! ***** SPOLÉČNÉ PARAMETRY PRO VYTVORENÍ BUDÍCÍCH CÍVEK POMOCÍ MAKRA RACE

! zadané parametry průtokoměru DN80
D_OUT_trubky = 88.9*1e-3 ! vnější průměr nerezové trubky průtokoměru

```

```

R_OUT_cela = (138/2)*1e-3 ! vnější polomer cela mag. stiniciho plaste
R_JC = 5e-3 ! polomer jadra (sloupku) civky - zvoleny parametr
TLP_PN = R_JC/2 ! tloušťka plechu poloveho nastavce (PN)

! !!!! pozn. k odvození tloušťky plechu PN - musí byt zachovan konst. prurez ...
! ... mag. obvodu prutokomeru, tj. plati rovnice  $S_J = S_{PN} \rightarrow \dots$ 
! ...  $\pi * R_{JC}^2 = 2 * \pi * R_{JC} * TLP_{PN} \rightarrow TLP_{PN} = R_{JC}/2$ 

mezera_JC = 0.002 ! velikost mezery mezi jadem a civkou
mezera_PNC = 0.001 ! velikost mezery mezi polovym nastavcem a civkou

SP_Coil = 14e-3 ! sirka prurezu kruhove civky
VP_Coil = 8e-3 ! vyska prurezu kruhove civky

! vzdalenost od pocatku syst. souradnic do stredu vodice ve smeru osy x
XC = R_JC + mezera_JC + SP_Coil/2

! vzdalenost od pocatku syst. souradnic do stredu vodice ve smeru osy y
YC = R_JC + mezera_JC + SP_Coil/2

RAD = YC-1e-4 ! radius zakriveni stredu vodice tvoriciho zavit
TCUR = 100 ! celkovy proud civkou (tece proti smeru WP)
DY = SP_Coil ! tloušťka civky v rovine xy
DZ = VP_Coil ! tloušťka civky ve smeru osy z

! ***** konec sekce s volitelnými parametry
! _____

! vzdalenost stredu civky od pocatku globalniho syst. souradnic ve smeru osy y
CIVKA_OY = D_OUT_trubky/2 + TLP_PN + mezera_PNC + DZ/2

! definice keypointu pro vytvoreni nove pracovni roviny (WP) - horni civka
K,1000,0,CIVKA_OY,0 ! novy pocatek prac. roviny
K,1001,1,CIVKA_OY,0 ! orientace osy x
K,1002,0,CIVKA_OY,1 ! bod urcujici novou prac. rovinu

KWPLAN,1,1000,1001,1002 ! vytvoreni nove orientovane pracovni roviny
RACE,XC,YC,RAD,TCUR,DY,DZ ! nastaveni makra RACE pro prislusnou budici civku
WPCSYS,-1,0 ! WP vracena zpet do (globalniho) kartezskeho systemu souradnic

! definice keypointu pro vytvoreni nove pracovni roviny (WP) - dolni civka
K,1000,0,-CIVKA_OY,0 ! novy pocatek prac. roviny
K,1001,1,-CIVKA_OY,0 ! orientace osy x
K,1002,0,-CIVKA_OY,1 ! bod urcujici novou prac. rovinu

KWPLAN,1,1000,1001,1002 ! vytvoreni nove orientovane pracovni roviny
RACE,XC,YC,RAD,TCUR,DY,DZ ! nastaveni makra RACE pro prislusnou budici civku
WPCSYS,-1,0 ! WP vracena zpet do (globalniho) kartezskeho systemu souradnic

! ##### nastaveni zobrazeni geometrie elementu budicich civek
/PNUM,ELEM,1 ! aktivace barevneho a ciselneho rozliseni elementu
/NUMBER,1 ! vypnuti zobrazeni cisel
EPLLOT ! vykresleni elementu SOURC36
/VIEW,1,1,1,1 ! izometricky pohled
/ANGLE,1
/AUTO,1 ! priblizeni a vycentrovani geometrie civek
/REPLLOT
/WAIT,5 ! program ceká 5s

! _____

! *****
! *
! * VYTVORENI GEOMETRIE NUMERICKEHO MODELU CIDLA INDUKCNIIHO PRUTOKOMERU *
! *
! *****
! _____
! VYTVORENI GEOMETRIE VRCHNIHO POLOVEHO NASTAVCE, ...
! ... JADRA A 1/4 VNITRNIHO MAG. OBVODU (VMO)

! ***** rozmery plechu poloveho nastavce (PN), jadra civky a plechu VMO

```

```

! !!!!! TLP_PN = tloušťka plechu PN a R_JC = polomer jadra cívky již ...
! ... definovány při vytváření budících cívek - viz sekce použití makra RACE

RP_IN_PN = D_OUT_trubky/2 ! vnitřní polomer plechu pol. nastavce
SP_PN = 0.055 ! šířka plechu pol. nastavce (ve směru osy Z) - zvolený parametr
URP_PN = 95 ! úhlová rozteč plechu PN ve stupních - zvolený parametr

! !!!!! je nutné zachovat konst. průřez mag. obvodu průtokoměru -->
! ... průřez plechu vnitřního mag. obvodu (VMO) se odvíjí od zvoleného ...
! ... polomeru jadra cívky R_JC

! !!!!! vnější polomer plechu (RP_OUT_VMO) VMO byl zvolen tak, aby byla ...
! ... mezi VMO a mag. stěnicím pláštěm rozteč 5mm

ROZTEC_VMO_MSP = 5e-3 ! rozteč mezi VMO a MSP

! vnější polomer plechu VMO (R_OUT_cela - viz předchozí sekce)
RP_OUT_VMO = R_OUT_cela - ROZTEC_VMO_MSP

TLP_VMO = R_JC/2 ! tloušťka plechu VMO (viz předchozí sekce)
SP_VMO = 20e-3 ! šířka plechu VMO - určeno vypočtem - min. 16mm
URP_VMO = 90 ! úhlová rozteč 1/4 pláště VMO ve stupních
RP_IN_VMO = RP_OUT_VMO - TLP_VMO ! vnitřní polomer plechu VMO

! ***** konec sekce s volitelnými parametry
! _____

! definice keypointu pro vytvoření nové pracovní roviny - pro plech vrchního PN
K,1000,0,0,-SP_PN/2 ! nový počátek prac. roviny
K,1001,1,0,-SP_PN/2 ! orientace osy x
K,1002,0,1,-SP_PN/2 ! bod určující rovinu

KWPLAN,1,1000,1001,1002 ! vytvoření nové orientované pracovní roviny

! vytvoření objemu - plech vrchního PN
CYL4,0,0,RP_IN_PN,90-URP_PN/2,RP_IN_PN+TLP_PN,90+URP_PN/2,SP_PN

WPCSYS,-1,0 ! WP vrácena zpět do (globálního) kartézského systému souřadnic

! definice keypointu pro vytvoření nové pracovní roviny - pro plech 1/4 VMO
K,1000,0,0,-SP_VMO/2 ! nový počátek prac. roviny
K,1001,1,0,-SP_VMO/2 ! orientace osy x
K,1002,0,1,-SP_VMO/2 ! bod určující rovinu

KWPLAN,1,1000,1001,1002 ! vytvoření nové orientované pracovní roviny

! vytvoření objemu - plech 1/4 VMO
CYL4,0,0,RP_IN_VMO,90-URP_VMO/2,RP_IN_VMO+TLP_VMO,90+URP_VMO/2,SP_VMO

WPCSYS,-1,0 ! WP vrácena zpět do (globálního) kartézského systému souřadnic

! definice keypointu pro vytvoření nové pracovní roviny - pro jádro cívky
K,1000,0,0,0 ! nový počátek prac. roviny
K,1001,1,0,0 ! orientace osy x
K,1002,0,0,-1 ! bod určující rovinu

KWPLAN,1,1000,1001,1002 ! vytvoření nové orientované pracovní roviny

CYL4,0,0,R_JC,,2*R_OUT_cela ! vytvoření válce o výšce 2*R_OUT_cela

! vytvoření jádra cívky
VPTN,all ! rozdělení objemu, nové objemy dány krizemi stavajících
VDELE,7,8,1,1 ! odstranění přebytečných objemu včetně ostatních entit

WPCSYS,-1,0 ! WP vrácena zpět do (globálního) kartézského systému souřadnic

NUMCMP,VOLU ! komprese číslování objemu, ploch a linií
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE

! _____
! VYTVORENÍ SPODNIHO POLOVEHO NASTAVCE, JADRA A 1/4 VNITRNIHO MAG. OBVODU

VSMM,Y,all ! zrcadlení všech objemu podle roviny ZX

```



```

!
! ZKOMPLETOVANI VNITRNIHO MAGNETICKEHO OBVODU
! vytvoreni keypointu v ose Z - jejich spojnice tvori osu pro rotaci plochy
K,2000,0,0,-2
K,2001,0,0,2
VROTAT,41,,,,,2000,2001,180-URP_VMO,1 ! orotovani plochy cislo 41 kolem osy Z
! uzavreni VMO ozrcadlenim objemu (vznikleho rotaci plochy) podle roviny yz
VSYMM,X,11
!
! VYTVORENI PRSTENCOVYCH CEL MAGNETICKEHO STINICHO PLASTE - MSP
! ***** zadane parametry pro mag. stinici plast - MSP
SP_MSP = 96e-3 ! sirka plechu MSP ve smeru osy z
TP_MSP = 2e-3 ! tloustka plechu MSP
TC_MSP = 5e-3 ! tloustka cel MSP
! !!!!! R_OUT_cela = vnejsi polomer cela MSP - jiz definovan v casti s RACE
! ***** konec sekce s volitelnymi parametry
! definice keypointu pro vytvoreni nove WP - pro celo ve smeru kladne osy z
K,1000,0,0,SP_MSP/2-TC_MSP! novy pocatek prac. roviny
K,1001,1,0,SP_MSP/2-TC_MSP! orientace osy x
K,1002,0,1,SP_MSP/2-TC_MSP! bod urcujici rovinu
! vytvoreni nove WP - pocatek posunut ve smeru kladne osy Z
KWPLAN,1,1000,1001,1002
CYL4,0,0,D_OUT_trubky/2,90,,TC_MSP ! vytvoreni 1/4 vnitriho objemu cela MSP
CYL4,0,0,D_OUT_trubky/2,0,R_OUT_cela,90,TC_MSP ! vytvoreni 1/4 objemu cela MSP
! vytvoreni 1/4 plechu MSP na vrchu cela
CYL4,0,0,R_OUT_cela,0,R_OUT_cela+TP_MSP,90,TC_MSP
! vytvoreni 1/4 plechu MSP mezi prstencovymi cely
CYL4,0,0,R_OUT_cela,0,R_OUT_cela+TP_MSP,90,-SP_MSP +2*TC_MSP
! ##### vykresleni drateneho modelu
/FACET,WIRE
! ozrcadleni vytvorene 1/4 objemu cela podle roviny xy - ...
! ... - vytvoreni 1/4 druheho cela
VSYMM,Z,13,15,1,0,0,0
! vytvoreni kompletnich objemu cel a plechu mag. stiniciho plaste
VSYMM,X,13,19,1,0,0,0 ! ozrcadleni 1/4 stineni podle roviny yz
VSYMM,Y,13,26,1,0,0,0 ! ozrcadleni 1/2 stineni podle roviny xz
!
! VYTVORENI VNITRNIHO OBJEMU MEZI MAG. STINICIM PLASTEM ...
! ... A VNITRNIH MAG. OBVODEM CIDLA
CYL4,0,0,R_OUT_cela,,,,-SP_MSP+2*TC_MSP! vytvoreni solid valce
WPCSYS,-1,0 ! WP vracena zpet do (globalniho) kartezskeho systemu souradnic
!
! VYTVORENI HRANICNI OBLASTI MODELU INDUKCNIHO PRUTOKOMERU
! ***** rozmery valce tvoriciho hranicni oblast
R_HO = 2*R_OUT_cela ! polomer hranicni oblasti
D_HO = 2*SP_MSP ! delka (vyska valce) hranicni oblasti
! definice keypointu pro vytvoreni nove WP - pro valec hranicni oblasti
K,1000,0,0,-D_HO ! novy pocatek prac. roviny
K,1001,1,0,-D_HO ! orientace osy x
K,1002,0,1,-D_HO ! bod urcujici rovinu
! vytvoreni nove WP - pocatek posunut ve smeru zaporne osy Z
KWPLAN,1,1000,1001,1002
CYL4,0,0,R_HO,,,,2*D_HO ! vytvoreni solid valce hranicni oblasti

```

```

WPCSYS,-1,0 ! WP vracena zpet do (globalniho) kartezskeho systemu souradnic
!
! _____
! APLIKACE PRIKAZU VPTN - ROZDELENI OBJEMU, ODSTRANENI ZDVOJENNYCH ENTIT
VPTN,ALL ! rozdeleni objemu, nove objemy dany krizenim stavajicich
NUMCMP,VOLU ! komprese cislovani objemu, ploch a linií
NUMCMP,AREA
NUMCMP,LINE
KDELE,1000,1002,1 ! Odstraneni pomocnych keypointu
KDELE,2000,2001,1
!
! _____
! ##### vypnuti ružice aktualni WP
WPSTYLE,,,,,,,,0
! ##### nastaveni zobrazeni geometrie cidla indukčního prutokomeru
/FACET,NORML ! vypnuti dratoveho modelu
/TYPE,1,7 ! v okne cis.1 nastaveno Capped Z-buffered zobrazeni
/CPLANE,1 ! rovina rezu dana WP
/PNUM,VOLU,1 ! aktivace barevneho a ciselneho rozliseni objemu
/NUMBER,1 ! vypnuti zobrazeni cisel objemu
VPLOT,ALL ! vykresleni vseh objemu
/VIEW,1,1,1,1 ! izometricky pohled
/ANGLE,1
/AUTO,1 ! priblizeni a vycentrovani geometrie cidla
/RELOT
/WAIT,5 ! program ceka 5s
!
! _____

```

Pozn: Z důvodu velkého rozsahu skriptu je v příloze uvedena jen jeho část generující geometrii numerického modelu čidla. Celý skript je spolu s ostatními datovými soubory pro program Ansys uveden na nosiči DVD - viz zadní strana desek této diplomové práce.

Příloha č.5 Programový skript s příkazy jazyku APDL pro uložení vypočtených hodnot mag. indukce do textového souboru

```

!
! _____
! VYKRESLENI GRAFU MAG. INDUKCE NA SPOJNICI MEZI ELEKTRODAMI
/POST1 ! spusteni postprocesoru
! !!!!! pozn.: pred pouzitim skriptu musi byt nacteny numericke vysledky
! ***** tloustka trubky a vystylky - nebyly v num. modelu uvazovany --> mi_r = 1
TLV = 1.45e-3 ! tloustka vystylky prutokomeru
TLT = 3e-3 ! tloustka trubky DN80 - 3mm
! ***** volitelne parametry cesty pro namapovani vysledku
NPTS = 2 ! pocet bodu urcujicich cestu (min. 2, max. 1000)
NSETS = 7 ! pocet datovych setu (min. 4, vychozi nastaveni - 30)
NDIV = 50 ! pocet rozdeleni mezi body (vychozi nastaveni - 20)
! ***** konec sekce s volitelnymi parametry
PATH,B_fce_x,NPTS,NSETS,NDIV ! definovani cesty B_fce_x
PPATH,1,,-(D_OUT_trubky/2-(TLV+TLT)),0,0 ! definice bodu c.1 - leva elektroda
PPATH,2,,D_OUT_trubky/2-(TLV+TLT),0,0 ! definice bodu c.2 - prava elektroda
! interpolace abs. hodnot vektoru mag. indukce podeľ nadefinovane cesty
PDEF,B_C,B,SUM,AVG
! ##### zobrazeni nadefinovane cesty v modelu
/PBC,PATH,1 ! aktivace zobrazeni prislusnych symbolu

```

```

/REPLOT      ! překreslení obrazovky
PLPATH,B_C   ! vykreslení grafu BC = fce(x)
PDEF,B_Y,B,Y,AVG ! interpolace hodnot y-ové složky mag. indukce podél def.
cesty
PDEF,B_X,B,X,AVG ! interpolace hodnot x-ové složky mag. indukce podél def.
cesty
/WAIT,5 ! program čeká 5s
PLPATH,B_Y,B_X ! vykreslení grafu By = fce(x) a Bx = fce(x)
!
! _____
! ULOZENÍ HODNOT MAG. INDUKCE NA SPOJNICI MEZI ELEKTRODAMI DO SOUBORU
! 3 - zobrazení pouze zpráv o chybě, 0 - zobrazení všech zpráv v dialog. okně
/UIS,MSGPOP,3
PAGET,MATRIX_POM, TABLE ! uložení nainterpolovaných hodnot do pomocné matice
!
! _____
!*CREATE,ulozeni_indukce,MAC ! vytvoření makra uložení_indukce
*MWRITE,MATRIX_POM(1,1),indukce_spojnice,txt,,JIK
(7F18.10)
*END ! konec příkazu makra uložení_indukce
!_ _ _ _ _
ulozeni_indukce ! provedení makra
/DELETE,ulozeni_indukce,MAC ! smazání makra uložení_indukce
PADELE,ALL ! smazání všech cest
*DEL,MATRIX_POM ! smazání pomocné matice
!
! _____
! ULOZENÍ HODNOT MAGNETICKÉ INDUKCE V PRŮREZU MĚŘICÍ TRUBICE ČIDLA DO SOUBORU ...
! ... POUŽITÍ KRUHOVÉ CESTY PRO INTERPOLACI HODNOT
! ***** volitelné parametry cesty pro namapování výsledku
NPTS = 2 ! počet bodů určujících cestu (min. 2, max. 1000)
NSETS = 8 ! počet datových setů (min. 4, výchozí nastavení - 30)
NDIV = 200 ! počet rozdělení mezi body (výchozí nastavení - 20)
! !!!!! pozn.: automaticky se uloží souřadnice XG,YG,ZG,S ...
! ... dále se uloží BC,BY,BX a BZ
! ***** nastavení parametru cyklu DO
IVAL = 1 ! počáteční hodnota proměnné K
FVAL = 25 ! počet cyklu
INC = 1 ! inkrement proměnné K
! ***** radiační souřadnice určující poloměr cesty
R_min = 1e-3 ! poloměr poslední kruhové cesty
R_max = D_OUT_trubky/2-TLT ! poloměr první kruhové cesty
R_DEK = (R_max-R_min)/(FVAL-1) ! dekrement radiusu kruhové cesty
! ***** definice třírozměrného pole pro uložení hodnot mag. indukce do souboru
IMAX = NDIV*(NPTS-1)+1 ! počet řádků
JMAX = NSETS ! počet sloupců = počet datových setů
KMAX = FVAL ! třetí dimenze (počet rovin) = počet cyklu
*DIM,MATRIX_BK,ARRAY,IMAX,JMAX,KMAX ! vytvoření 3D pole - matice pro uložení dat
! ***** konec sekce s volitelnými parametry
CSWPLA,1000,1 ! definice lokálního cylindrického systému
CSCIR,1000,1 ! lokace singularity pro zvolený cylindrický systém v 0 stupních
!
! _____
!*DO,K,IVAL,FVAL,INC ! začátek cyklu DO
PATH,B_DATA,NPTS,NSETS,NDIV ! nadefinování cesty B_DATA

```

```

PPATH,1,,R_max,0.1E-05,0 ! definice bodu c.1
PPATH,2,,R_max-1E-6,-0.1E-05,0 ! definice bodu c.2

PDEF,B_C,B,SUM,AVG ! interp. abs. hodnot vektoru mag. indukce
PDEF,B_X,B,X,AVG ! interp. hodnot x-ove složky mag. indukce
PDEF,B_Y,B,Y,AVG ! interp. hodnot y-ove složky mag. indukce
PDEF,B_Z,B,Z,AVG ! interp. hodnot z-ove složky mag. indukce

PAGET,MATRIX_POM,TABLE ! ulozeni hodnot do pomocne matice

R_max = R_max - R_DEK ! dekrementace polomeru kruhove cesty

! zkopirovani pomocne matice do 3D pole
*MFUN,MATRIX_BK(1,1,K),COPY,MATRIX_POM(1,1)

*DEL,MATRIX_POM ! smazani pomocne matice
PADELE,B_DATA ! smazani cesty B_DATA

*ENDDO ! konec cyklu DO
!

---


! ULOZENI HODNOT Z MATICE MATRIX_BK DO SOUBORU

!

---


*CREATE,ULOZENI_DO_SOUBORU,MAC ! vytvoreni makra ULOZENI_DO_SOUBORU

! ulozeni dat z matice do textoveho souboru - KC = kruhova cesta
*MWRITE,MATRIX_BK(1,1,1),indukce_data_KC,txt,,JIK
(8F18.10)

*END ! konec prikazu makra ULOZENI_DO_SOUBORU
!

---


ULOZENI_DO_SOUBORU ! provedeni makra

/DELETE,ULOZENI_DO_SOUBORU,MAC ! smazani makra ULOZENI_DO_SOUBORU

*DEL,MATRIX_BK ! smazani datove matice

!

---


! ULOZENI INFORMACI PRO NASLEDNE ZPRACOVANI DAT V PROGRAMU MATLAB

!

---


*CREATE,INFORMACE_DATA,MAC! vytvoreni makra INFORMACE_DATA

! vytvoreni a otevreni textoveho souboru pro zapis
*CFOPEN,'info_mag_pole_KC','txt'

! ulozeni dimenzi matice MATRIX_BK pro pozdejsi nacteni dat ze souboru
*VWRITE,IMAX,JMAX,KMAX
(F8.2,/,F8.2,/,F8.2)

! ulozeni souradnic bodu definujici cesty
*VWRITE,R_min,R_DEK
(F13.10,/,F13.10)

! !!!! pozn: IMAX = pocet radku, JMAX = pocet sloupce, ...
! ... KMAX = pocet rovin resp. pocet cyklu

*CFCLOSE ! zavreni textoveho souboru

*END ! konec makra INFORMACE_DATA
!

---


INFORMACE_DATA ! provedeni makra

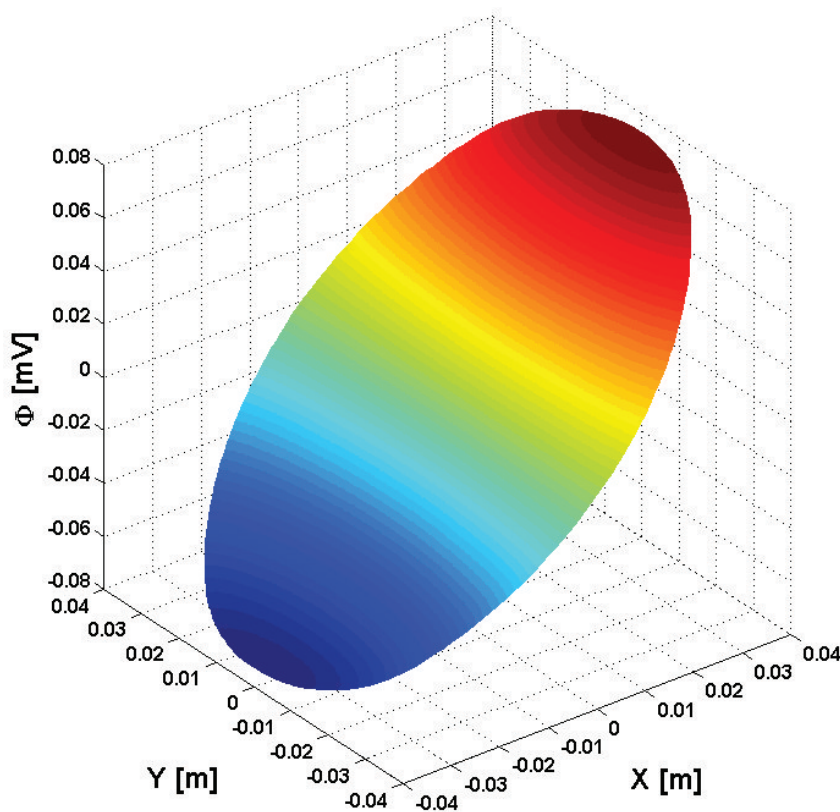
/DELETE,INFORMACE_DATA,MAC ! smazani makra INFORMACE_DATA
!

---

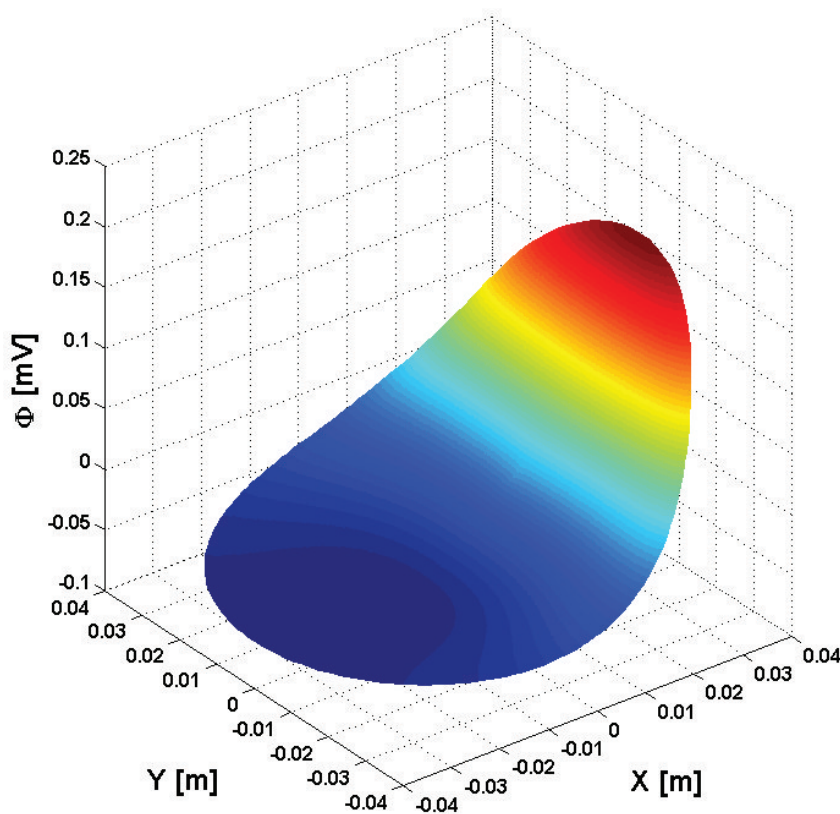

CSYS,0 ! nastaveni cartezskeho systemu souradnic pro tvorbu geometrie

```

Příloha č.6 Grafické rozložení el. potenciálu v průtočném průřezu čidla DN80 při respektování y-ové složky mag. indukce - varianta s VMO

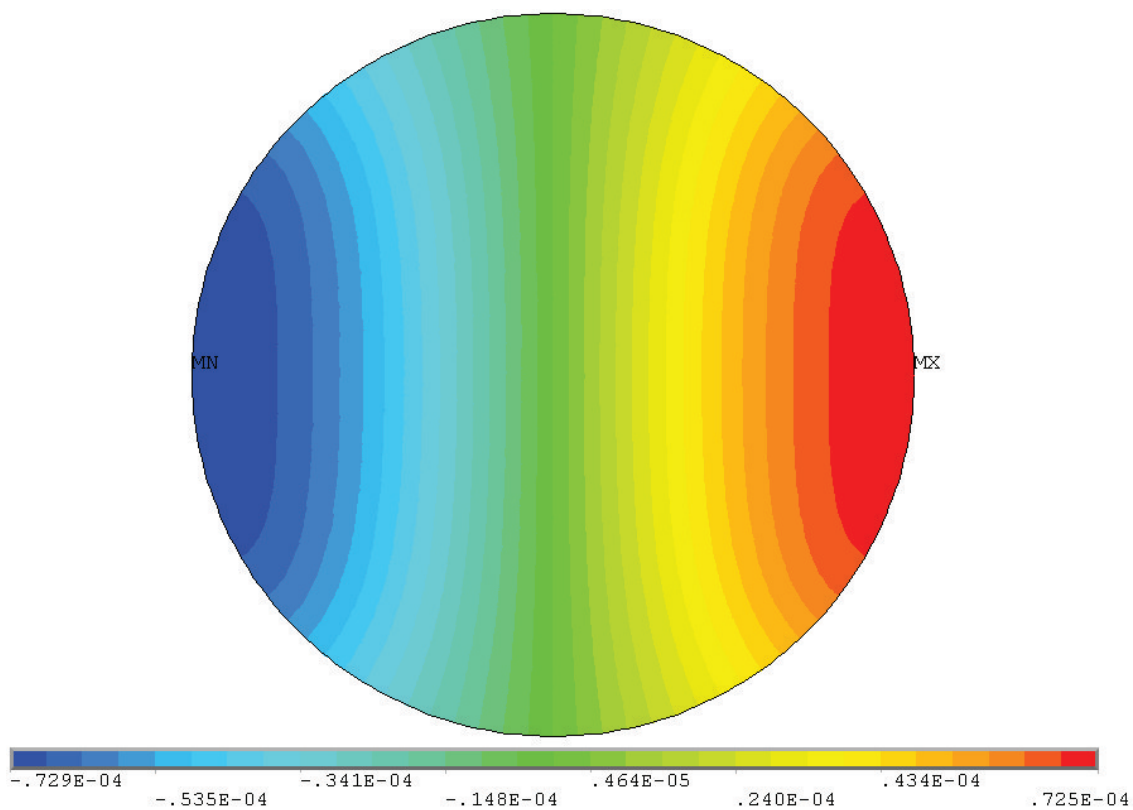


Obr. č.13 Prostorové rozložení el. potenciálu ϕ [mV] pro laminární rychlostní profil - $\phi = f(x,y)$

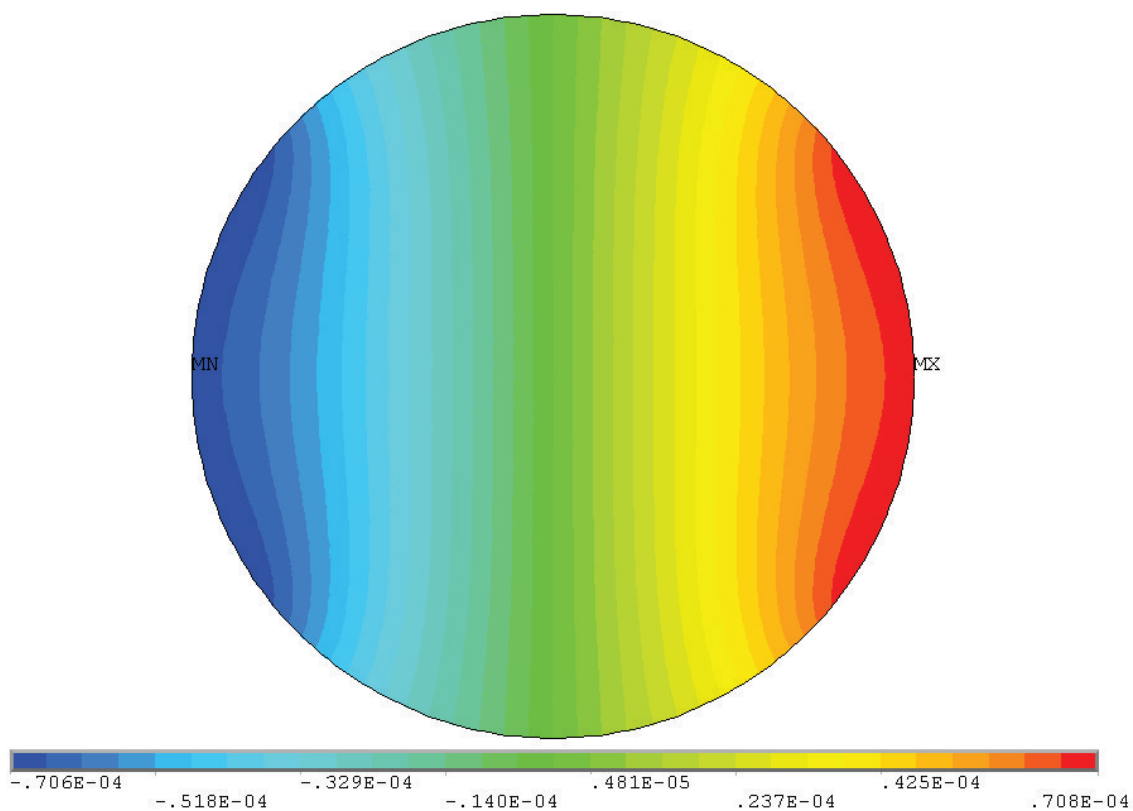


Obr. č.14 Prostorové rozložení el. potenciálu ϕ [mV] pro asymetrický rychlostní profil - $\phi = f(x,y)$

Příloha č.7 Ansys - rozložení el. potenciálu v průtočném průřezu čidla DN80 při respektování x-ové a y-ové složky mag. indukce - varianta s VMO

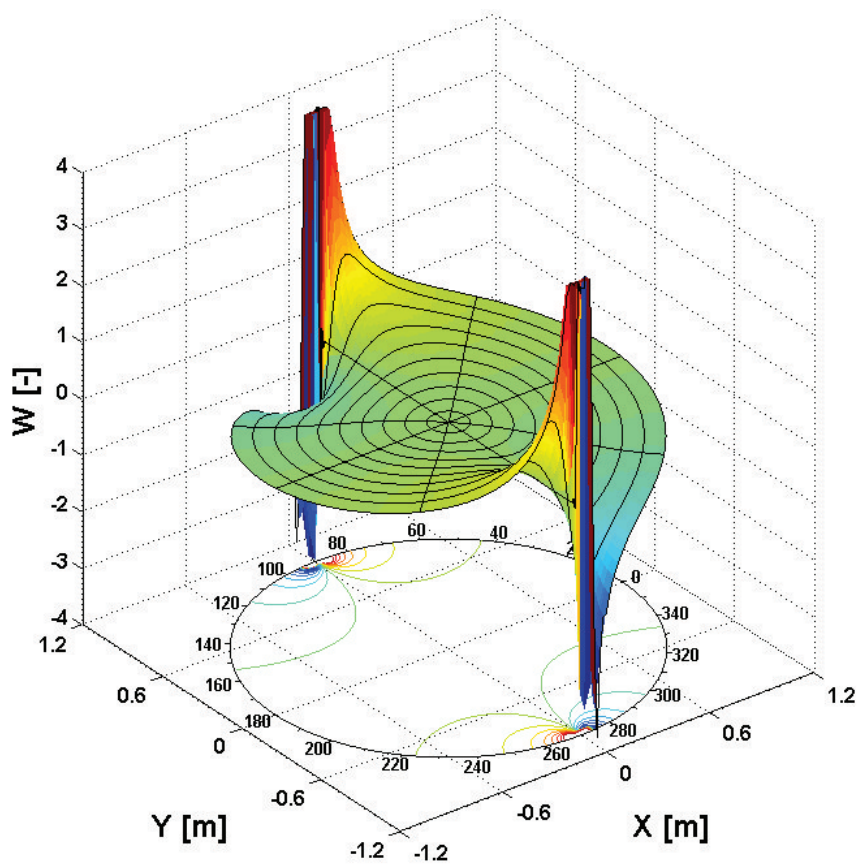


Obr. č.15 Rozložení el. potenciálu ϕ [V] při laminárním proudění, $\bar{V} = 1 \text{ ms}^{-1}$ - rovina řezu xy, $z = 0$

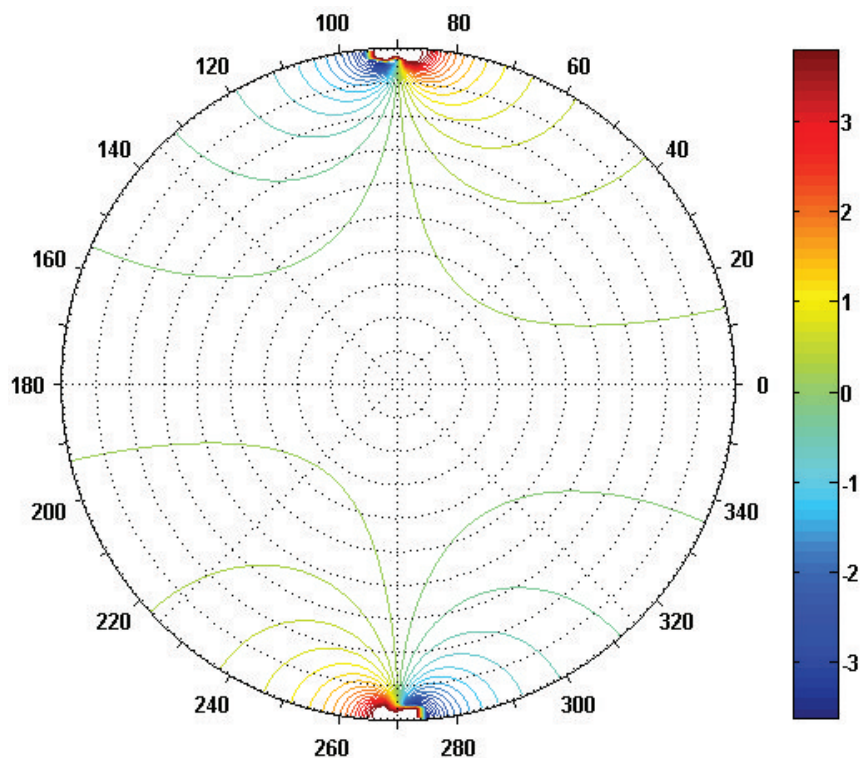


Obr. č.16 Rozložení el. potenciálu ϕ [V] při turbulentním proudění, $\bar{V} = 1 \text{ ms}^{-1}$ - rovina řezu xy, $z = 0$

Příloha č.8 Prostorové rozložení váhové funkce (5.9) při respektování pouze x-ové složky mag. indukce - výpočet při $B_x(r,\varphi) = 1 \text{ T}$, $W = fce(r,\varphi)$

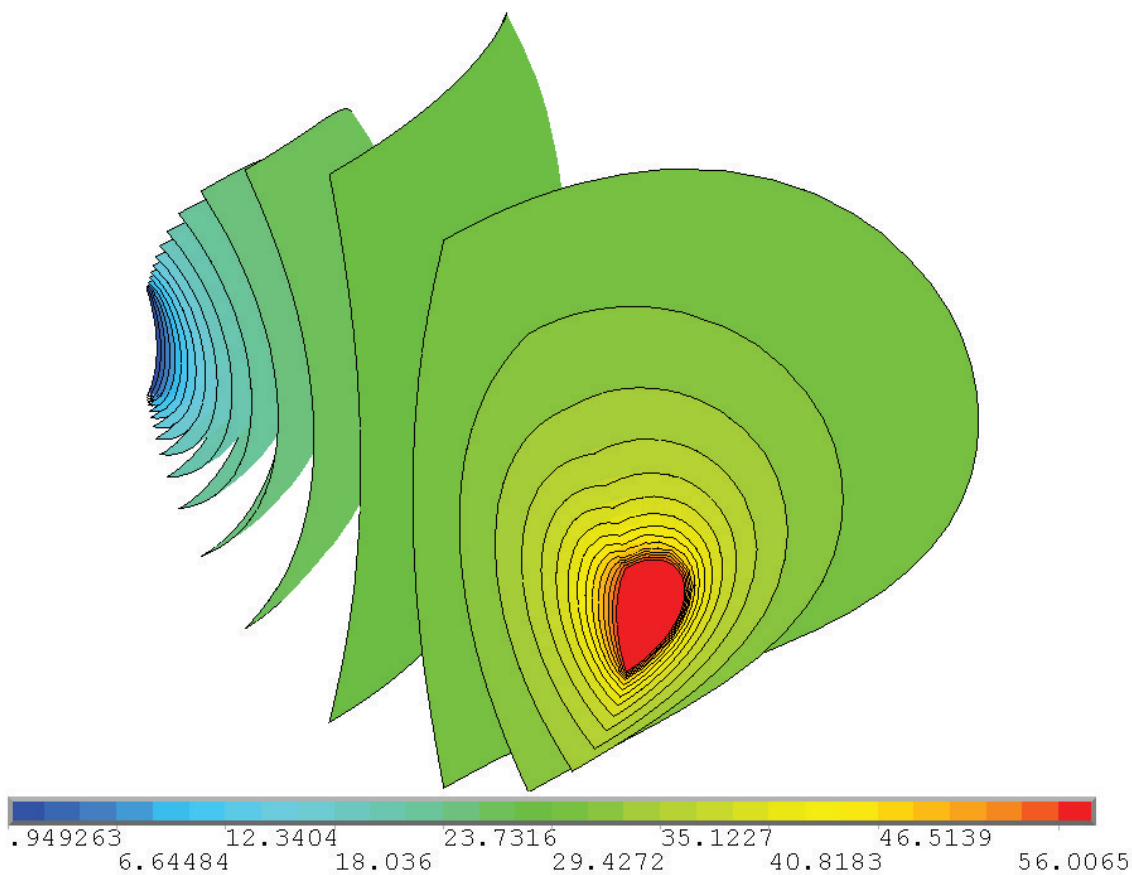


Obr. č.17 Prostorové rozložení váhové funkce - bodové elektrody, $\varphi_1 = 90^\circ$, $\varphi_2 = 270^\circ$

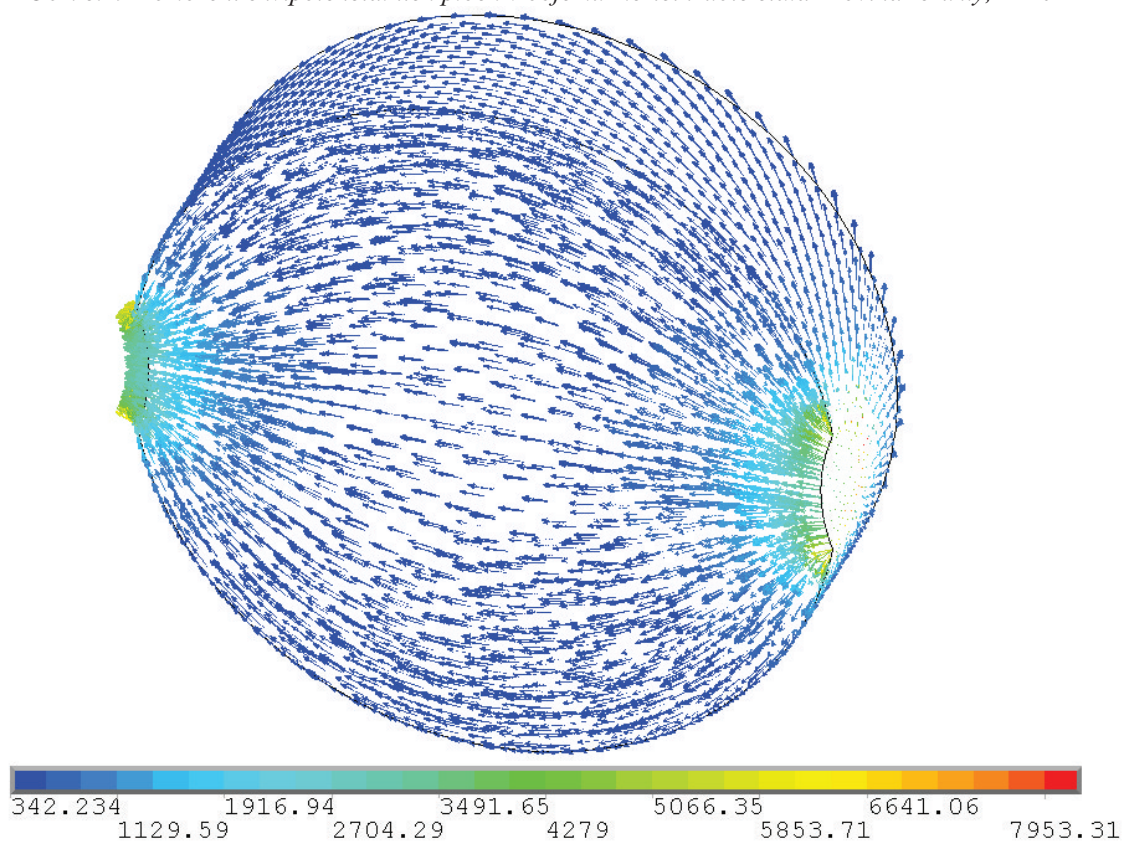


Obr. č.18 Izolinie váhové funkce v průtočném průřezu čidla - bodové elektrody, $\varphi_1 = 90^\circ$, $\varphi_2 = 270^\circ$

Příloha č.9 Metoda virtuálního proudu - grafické výsledky z programu Ansys

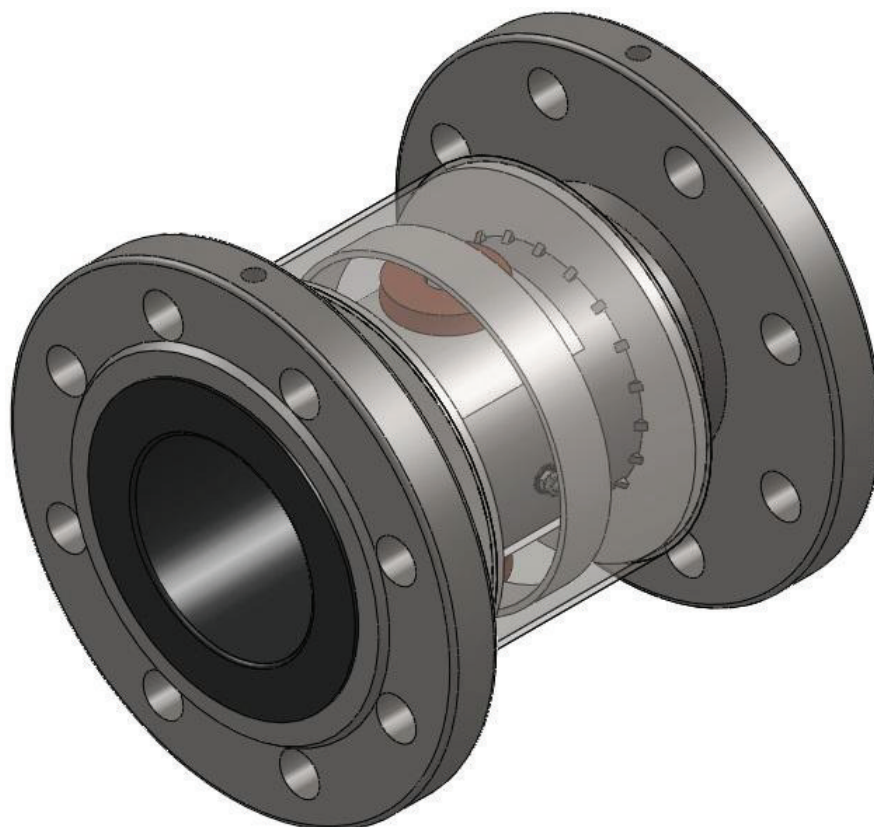


Obr. č.19 Rozložení ekvipotenciálních ploch v objemu měřicí trubice čidla - rovina řezu xy, z = 0

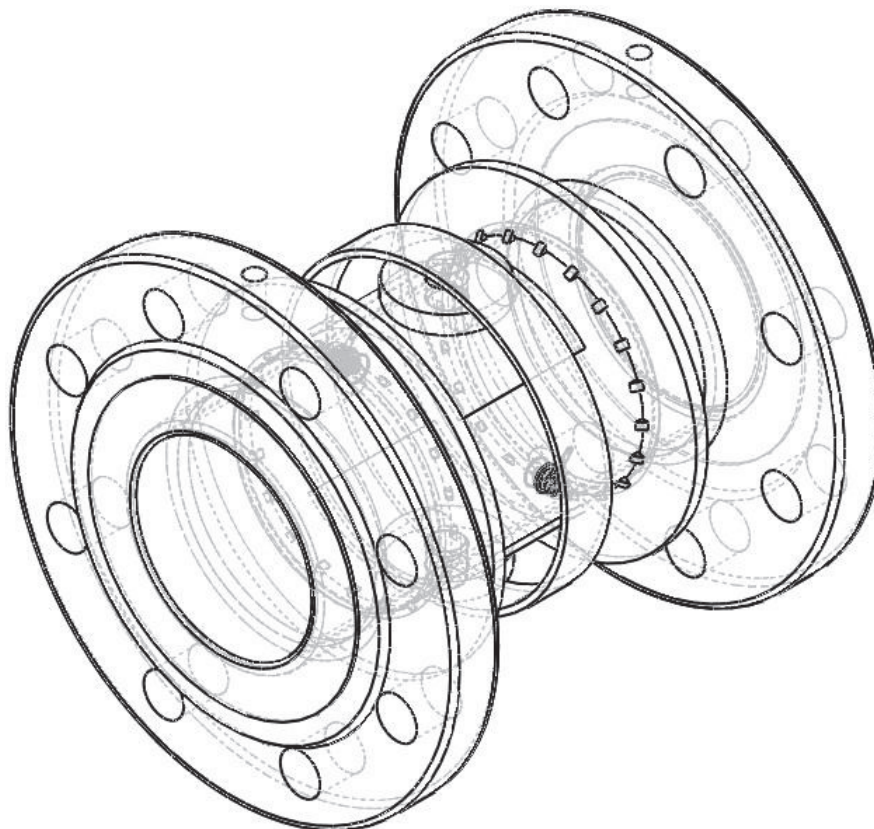


Obr. č.20 Rozložení vektorů proudové hustoty virtuálního proudu v objemu měřicí trubice - rovina řezu xy

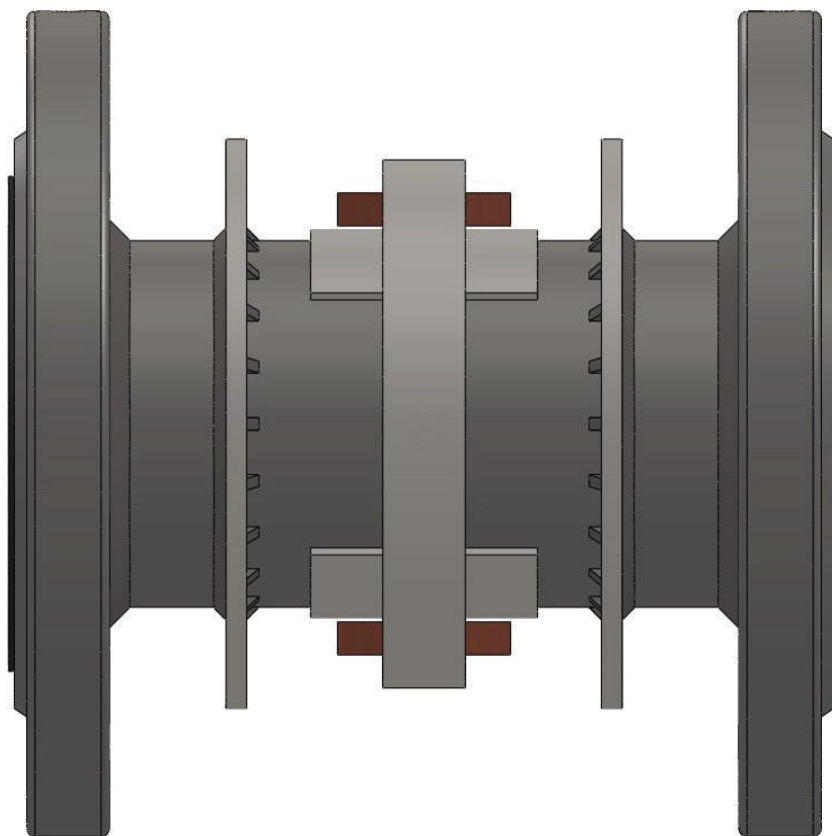
Příloha č.10 CAD model čidla DN80 s vnitřním mag. obvodem - SolidWorks 2010



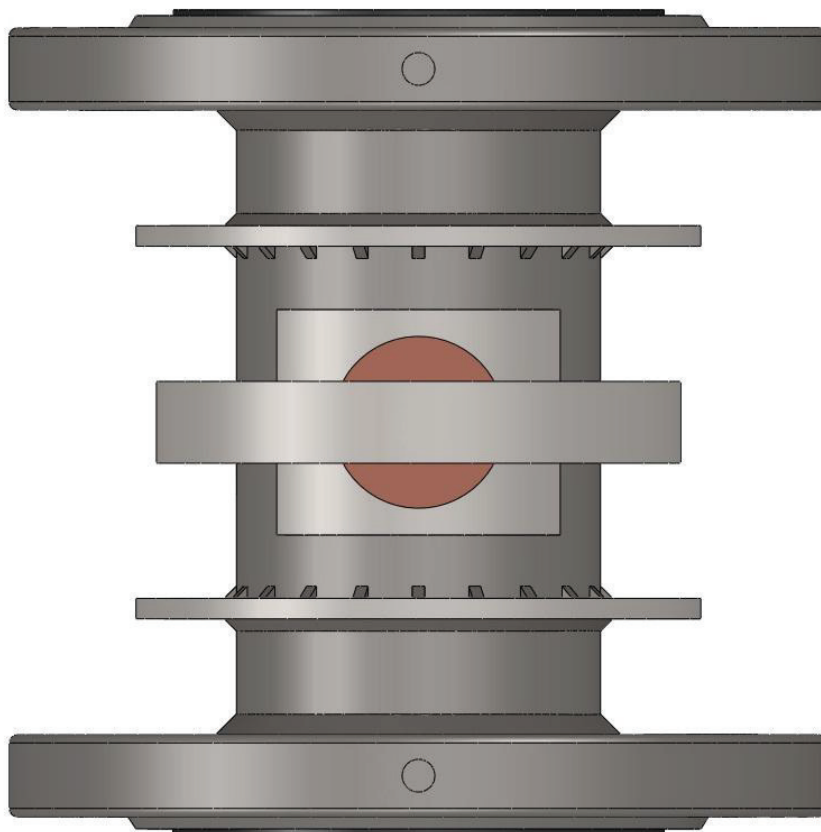
Obr. č.21 CAD model čidla DN80 s vnitřním mag. obvodem - průhledný stínící feromag. plášť, izomet. pohled



Obr. č.22 CAD model čidla DN80 s vnitřním mag. obvodem - bez stínícího feromag. pláště, izomet. pohled

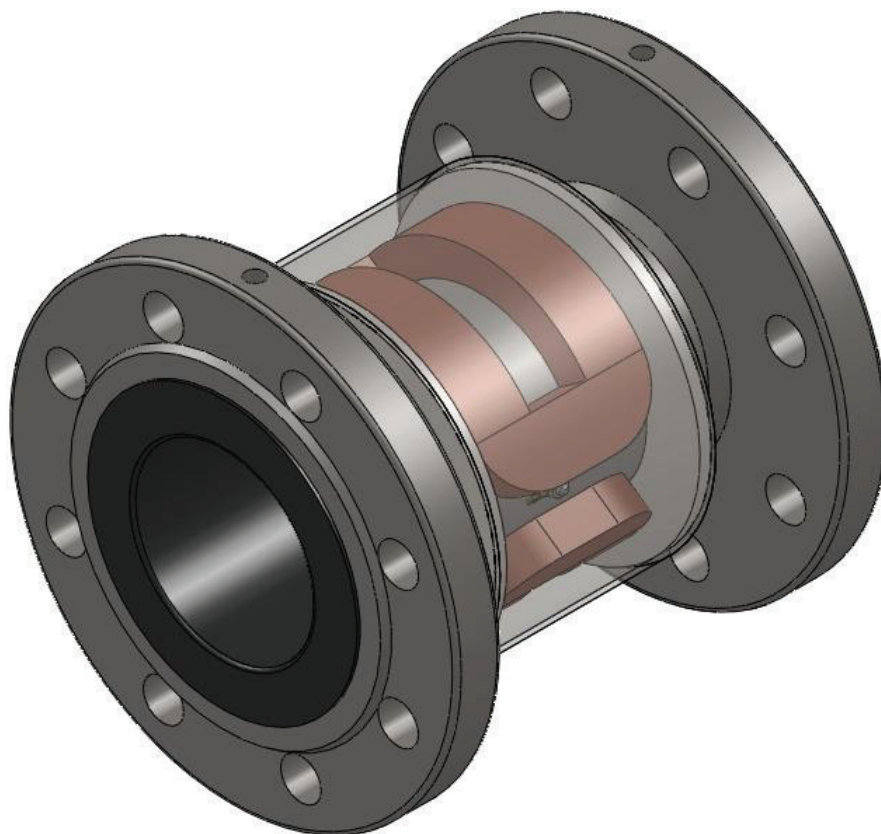


Obr. č.23 CAD model čidla DN80 s vnitřním mag. obvodem - bez stínícího feromag. pláště, pohled z boku

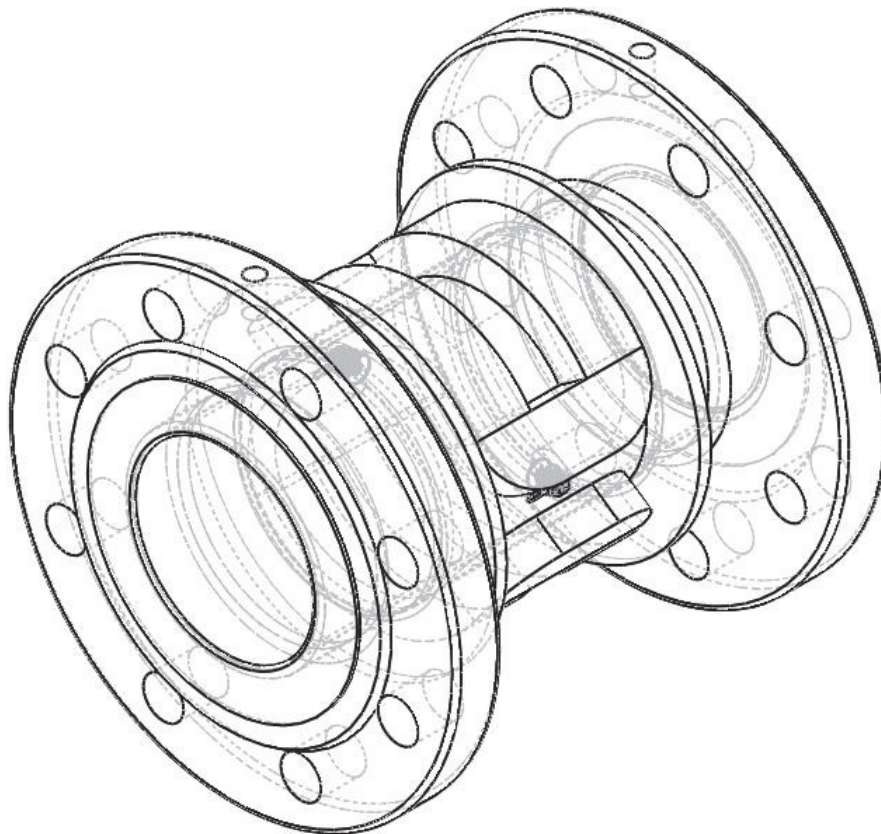


Obr. č.24 CAD model čidla DN80 s vnitřním mag. obvodem - bez stínícího feromag. pláště, pohled shora

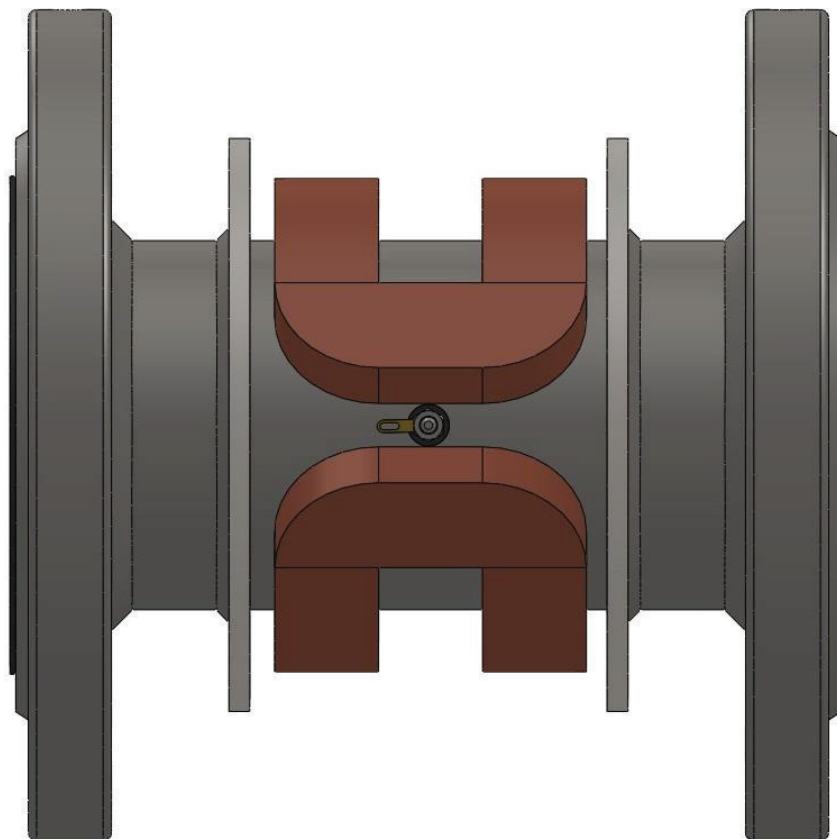
Příloha č.11 CAD model čidla DN80 se sedlovými cívkami - SolidWorks 2010



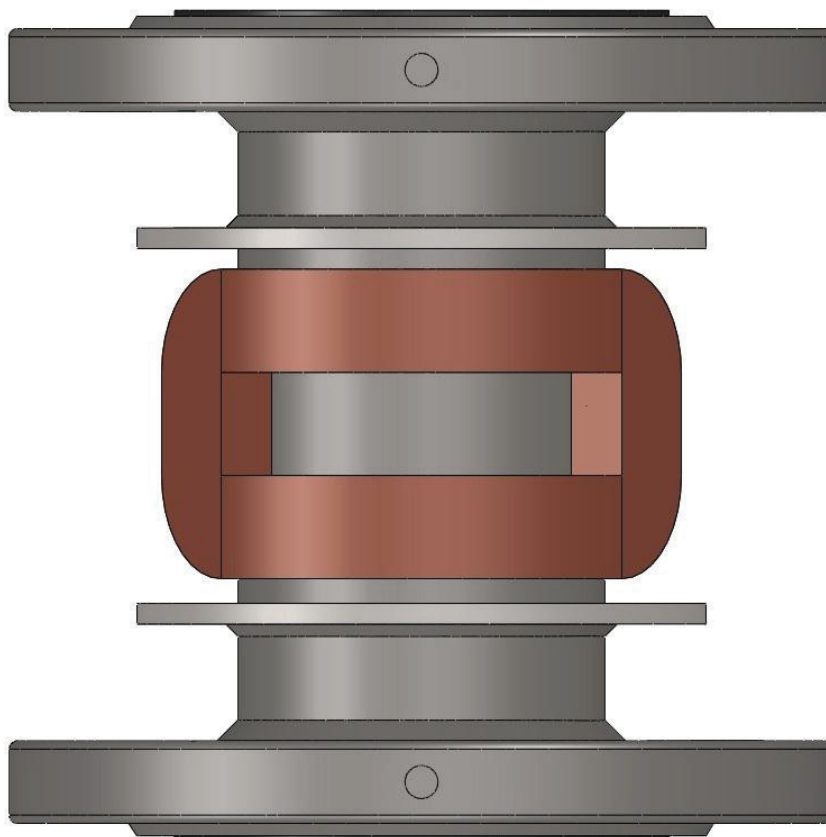
Obr. č.25 CAD model čidla DN80 se sedlovými cívkami - průhledný stínící feromag. plášť, izometrický pohled



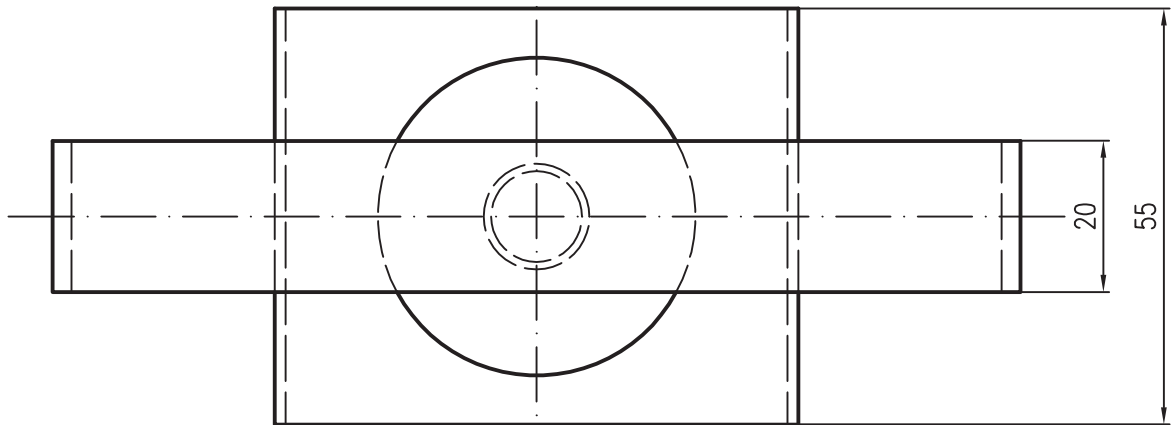
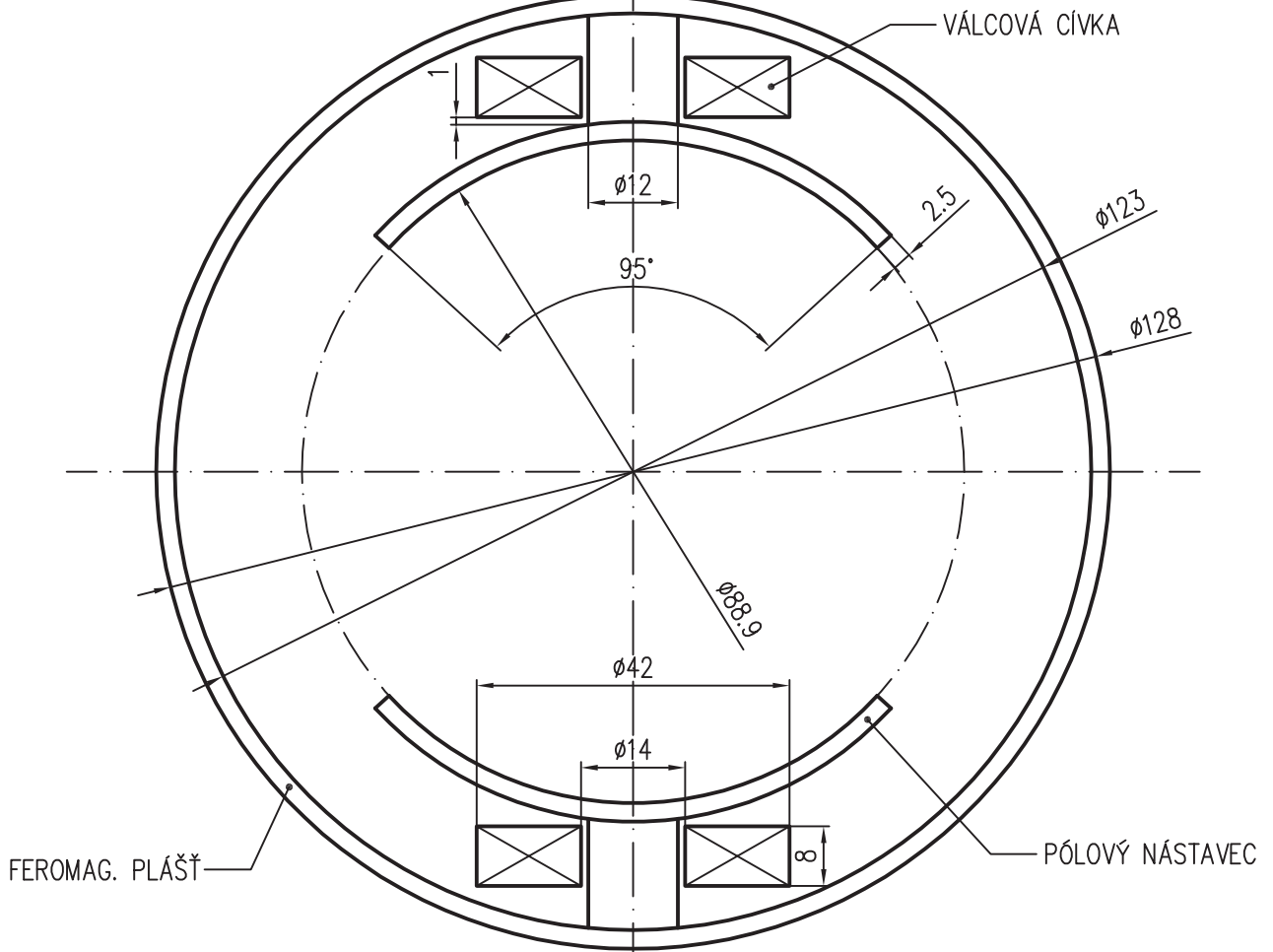
Obr. č.26 CAD model čidla DN80 se sedlovými cívkami - bez stínícího feromag. pláště, izometrický pohled



Obr. č.27 CAD model čidla DN80 se sedlovými cívkami - bez stinícího feromag. pláště, pohled z boku



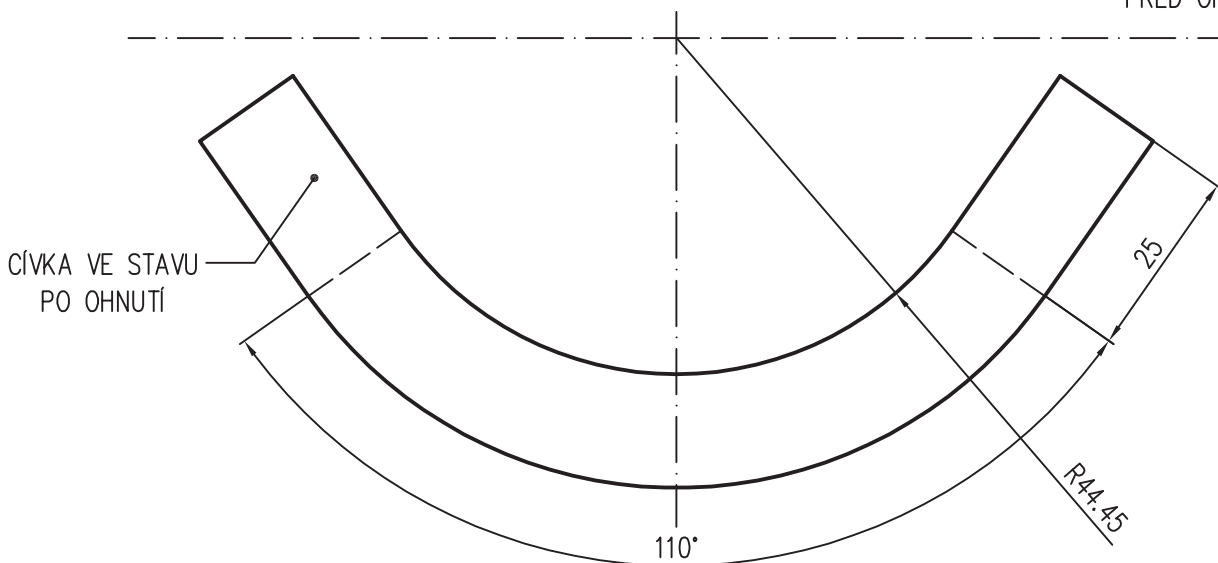
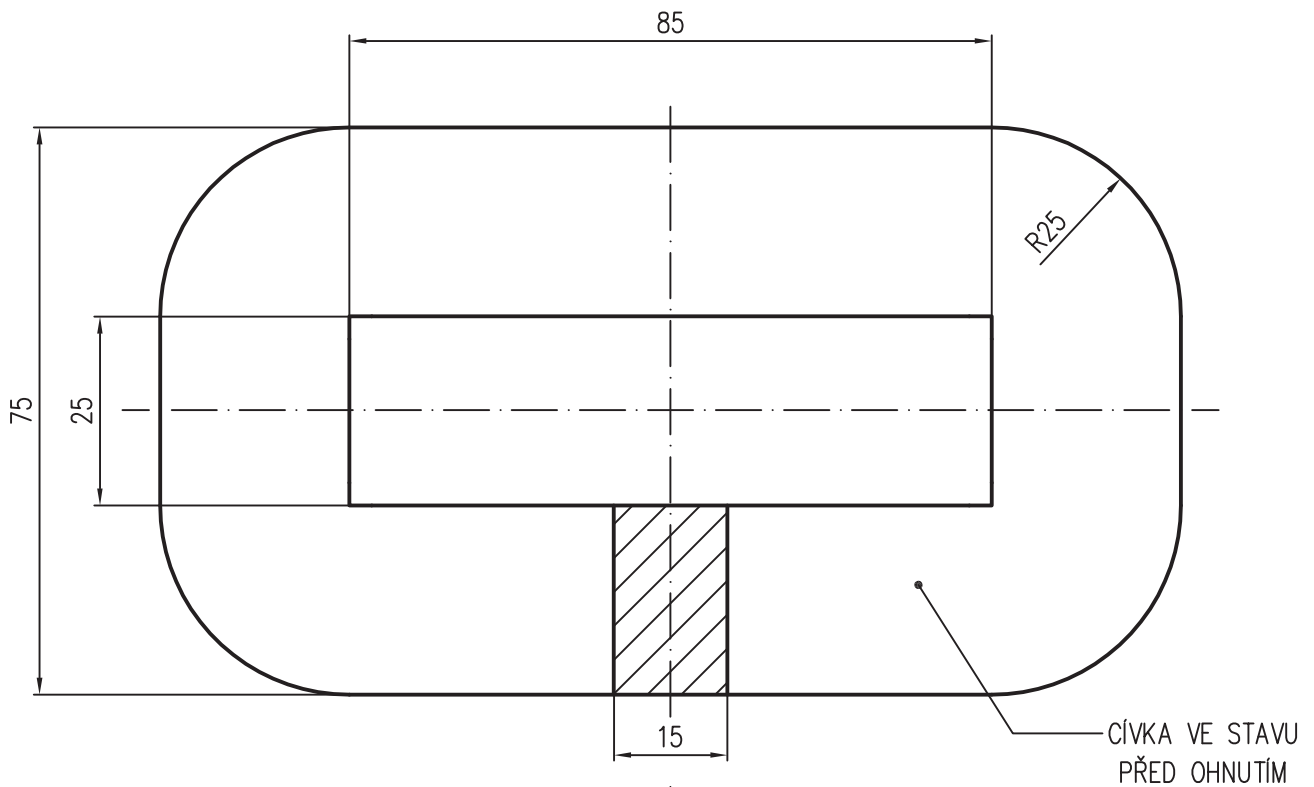
Obr. č.28 CAD model čidla DN80 se sedlovými cívkami - bez stinícího feromag. pláště, pohled shora


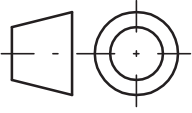


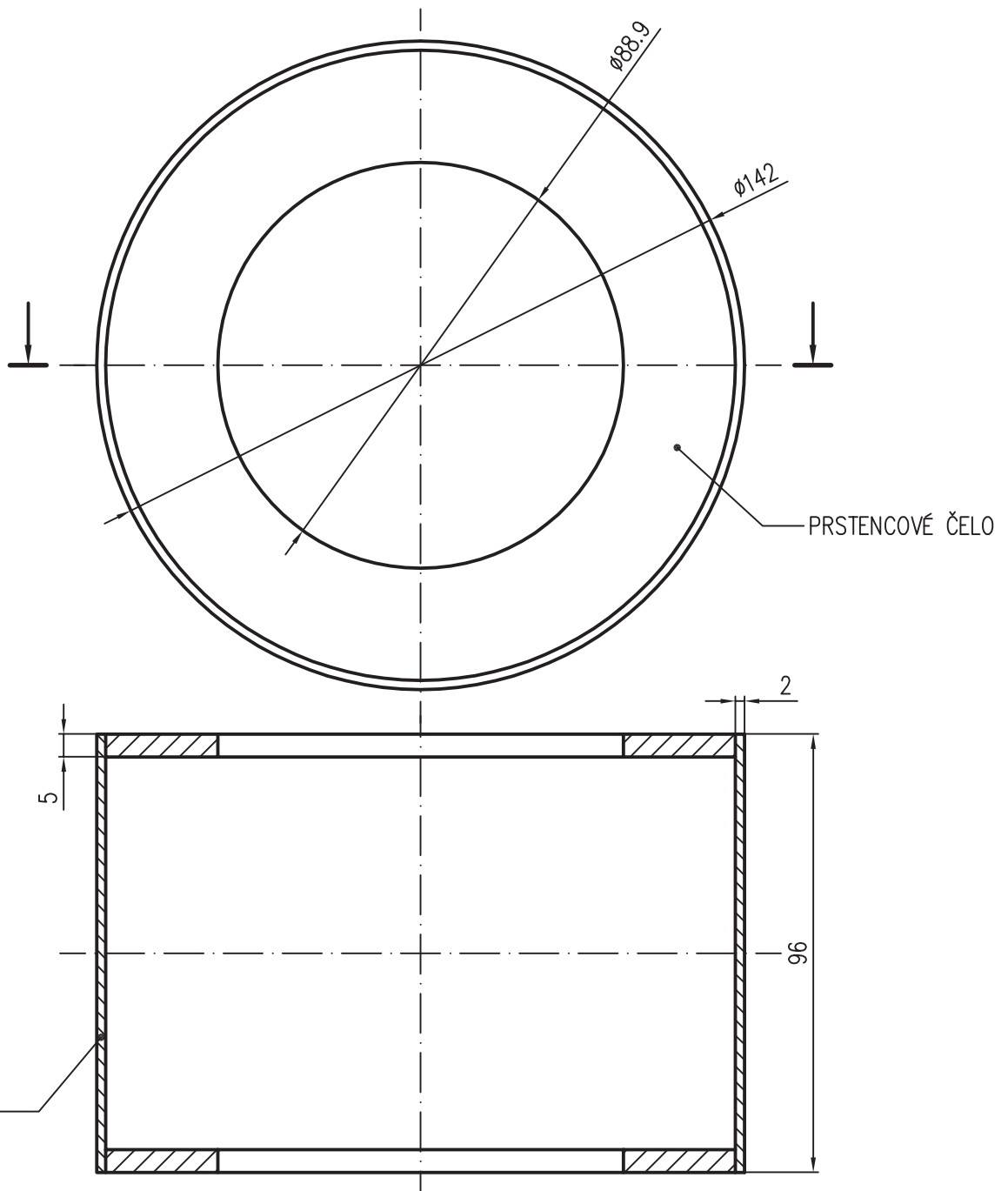
Index		Změna		Provedl		Schválil		Datum	
		Datum		4.5.2012		Fakulta elektrotechnická Katedra elektroenergetiky a ekologie			
		Kreslil		PETR POLÍVKA					
		Schválil							
		Měřítko		1:1		Hmotnost			
		Materiál		OCEL ČSN 11 373					
		Typ		ČIDLO INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU					
Název VNITŘNÍ MAGNETICKÝ OBVOD ČIDLA DN80						Číslo výkresu P0012		Index	
						Listů/List			



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI



Index		Změna		Provedl		Schválil		Datum	
		Datum		4.5.2012		Fakulta elektrotechnická Katedra elektroenergetiky a ekologie			
		Kreslil		PETR POLÍVKA					
		Schválil							
		Měřítko		1:1		Hmotnost			
		Materiál		MĚĎ		 ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI			
		Typ		ČIDLO INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU					
		Název		SEDLOVÁ CÍVKA ČIDLA DN80				Číslo výkresu P0013	
						Listů/List		Index	



Index		Změna		Provedl	Schválil	Datum	
		Datum	4.5.2012	Fakulta elektrotechnická Katedra elektroenergetiky a ekologie			
		Kreslil	PETR POLÍVKA				
		Schválil					
		Měřítko	NENÍ	Hmotnost			
		Materiál	OCEL ČSN 11 373				
		Typ	ČIDLO INDUKČNÍHO PRŮTOKOMĚRU				
Název				Číslo výkresu		Index	
FEROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ ČIDLA DN80				P0014			
				Listů/List			

