

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh indukčnosti 6 mH

Vojtěch Doležel 2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch DOLEŽEL**
Osobní číslo: **E15N0051P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Návrh indukčnosti 6mH**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište metodiku při návrhu vzduchové cívky.
2. Proveďte a optimalizujte dle ceny návrh vzduchové cívky s indukčností 6mH pro trvalý proud 6,5A 50Hz sinus.
3. Návrh proveďte pro kostru cívky s dutinou válcovou a pravoúhlou.
4. Proveďte tepelný výpočet a kontrolu indukčnosti pomocí metody FEM.
5. Shrňte dosažené výsledky.

Abstrakt

Předkládaná práce popisuje návrh vzduchové cívky s indukčností 6 mH. V souladu se zadáním je cívka navržena na trvalý harmonický proud s efektivní hodnotou 6,5 A. Návrh je proveden pro cívku s kruhovým průřezem. Je zde také uveden způsob výpočtu indukčnosti cívky s pravoúhlým průřezem. Hlavní důraz je kladen na minimalizaci rozměrů, hmotnosti a ceny cívky. V první části práce jsou vyjmenovány různé způsoby návrhu vzduchové cívky. Druhá část práce je zaměřena na ověření analytického výpočtu pomocí metody konečných prvků (MKP). Ve třetí části je popsán proces výroby několika funkčních vzorků a jejich měření. V závěru práce jsou výsledky měření porovnány s analytickými výpočty. Z porovnání je zřejmé, že analytický výpočet je vhodný pouze pro prvotní návrh. V případě, že potřebujeme přesnější výsledky, je lepší použít metodu konečných prvků.

Klíčová slova

vzduchová cívka, indukčnost, oteplení, metoda konečných prvků (MKP), minimalizace cívky, teplotní třída, magnetické veličiny, funkční vzorek, oteplovací zkouška

Abstract

This report describes design of an air core coil with inductance of 6 mH. According to the assignment, the coil is designed for permanent harmonic current with effective value of 6,5 A. The design is made for the core with circular cross section area. Calculation of inductance of the coil with rectangular cross section area is listed as well. The main emphasis is the minimizing of the dimensions, the mass and the costs. In the first part of the thesis, there are listed some different ways of the design of the air coil. The second part is about verifying of the analytic calculation by using the finite element method (FEM). In the third part, there is described the process of making of several functional samples, which were measured. The results of the measurements with analytic calculations are compared at the end of this thesis. It is obvious from the comparison that the analytic calculations are good only for the first design. If the more precision results are needed, it is better to use the finite element method.

Key words

air coil, inductance, warming, finite element method, minimizing of the coil, temperature class, magnetic qualities, function sample, warming test.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 17.05.2017

Vojtěch Doležel

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k řešení této diplomové práce. Dále děkuji svým rodičům Ireně a Janovi Doleželovým, svým bratrům Václavovi a Martinovi, firmě ELFITO, Jiřímu Lahodovi, Barboře Ševčíkové, Tomášovi Bartákovi a Michalovi Rokovi za pomoc a rady při řešení této práce, zejména při tvorbě funkčních vzorků.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	8
ÚVOD.....	11
1 METODIKA PŘI NÁVRHU VZDUCHOVÉ CÍVKY.....	12
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE.....	12
1.2.NÁVRH VÁLCOVÉ VZDUCHOVÉ CÍVKY – NAGAOKA.....	17
1.3.NÁVRH VÁLCOVÉ VZDUCHOVÉ CÍVKY – WHEELER.....	18
1.4.NÁVRH VÁLCOVÉ VZDUCHOVÉ CÍVKY – NOMOGRAM.....	20
1.5.NÁVRH VÁLCOVÉ VZDUCHOVÉ CÍVKY – MAYER.....	22
1.6.NÁVRH VZDUCHOVÉ VÁLCOVÉ CÍVKY – PATOČKA.....	30
2 NÁVRH VZDUCHOVÉ CÍVKY.....	44
2.1 VÁLCOVÁ DUTINA.....	44
2.2 PRAVOÚHLÁ DUTINA:.....	48
3 KONTROLA VLASTNÍ INDUKČNOSTI CÍVKY (MKP).....	51
3.1 VÁLCOVÁ DUTINA.....	51
3.2 PRAVOÚHLÁ DUTINA.....	54
4 KONTROLA OTEPLENÍ CÍVKY (MKP).....	59
5 POPIS FUNKČNÍCH VZORKŮ CÍVKY.....	63
5.1 VZOREK Č. 1.....	63
5.2 VZOREK Č. 2.....	64
5.3 VZOREK Č. 3.....	68
5.4 VZOREK Č. 4.....	71
5.5 VZOREK Č. 5.....	74
6 SHRNUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	78
7 SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	80
8 PŘÍLOHY.....	82
8.1 SKRIPT PRO VÝPOČET VLASTNÍ INDUKČNOSTI CÍVKY.....	82
8.2 FOTOGRAFIE Z VÝROBY A MĚŘENÍ FUNKČNÍCH VZORKŮ.....	88

Seznam symbolů a zkratek

ΔP	ztrátový výkon cívky
A	magnetický vektorový potenciál
a	střední poloměr cívky, tloušťka cívky
b	délka cívky
\mathbf{B}	vektor magnetické indukce
B	velikost vektoru magnetické indukce
c	tloušťka cívky
C_{par}	parazitní kapacita vinutí cívky
D	střední průměr cívky, kolmá vzdálenost vodičů
d	průměr drátu, cívky
$d\mathbf{B}$	element magnetické indukce
d_i	vnitřní průměr cívky
d_{iz}	průměr drátu včetně izolace
dl	element délky
d_{max}	vnější průměr cívky
d_{min}	vnitřní průměr cívky
\mathbf{D}_n	kolmá složka elektrické indukce
d_o	vnější průměr cívky
$d\mathbf{S}$	element plochy
dV	element objemu
\mathbf{F}	vektor síly působící na částici nebo vodič
F_m	magnetické napětí
\mathbf{H}	vektor intenzity magnetického pole
H	velikost vektoru intenzity magnetického pole
I	proud protékající vodičem nebo cívkou
$i(t)$	časově proměnný proud protékající cívkou
I_b	budící proud protékající jedním závitem cívky
I_{ef}	efektivní hodnota harmonického proudu
\mathbf{J}	velikost vektoru proudové hustoty
\mathbf{J}	vektor proudové hustoty
k	koeficient zvětšení délky

\mathbf{k}	jednotkový vektor ve směru osy z
K	Nagaokův koeficient
k_p	činitel plnění vinutí
L	vlastní indukčnost cívky
l	délka vodiče nebo cívky
L_0	činitel závislý na poměru délky ke střednímu průměru a na poměru radiální tloušťky ke střednímu průměru
l_{Cu}	celková délka vodiče, drátu
l_{mz}	tloušťka mezní vrstvy
l_{skut}	skutečná délka cívky
l_{str}	délka středního závitu
M	vzájemná indukčnost
n	počet závitů cívky vztažený na jednotku délky, počet závitů
N	počet závitů cívky
N_v	počet závitů v jedné poloze (vrstvě)
$O_{stř}$	střední obvod cívky
P, Q, M	obecný bod ležící v prostoru
Q	náboj částice pohybující se v magnetickém poli
r	velikost vektoru vzdálenosti, střední poloměr cívky, poloměr vodiče
\mathbf{r}	vektor vzdálenosti
R_{20}	odpor při teplotě 20 °C
R_{Cu}	odpor vinutí cívky
R_m	magnetický odpor
R_{Pt}	odpor Pt – článku
$R_{Pt_{ext}}$	odpor Pt – článku umístěného na povrchu vinutí cívky
$R_{Pt_{int}}$	odpor Pt – článku umístěného ve vinutí cívky
S	orientovaná plocha
S	plocha, průřez cívky
S_{Cu}	průřez vodiče, průřez drátu
S_p	chladící povrch cívky
$T_{okolí}$	teplota okolí
T_{Pt}	teplota měřená Pt – článkem
$T_{Pt_{ext}}$	teplota měřená Pt – článkem umístěným na povrchu vinutí cívky

$T_{P_{int}}$	teplota měřená Pt – článkem umístěným ve vinutí cívky
U_{ef}	efektivní hodnota harmonického napětí
$u_i(t)$	napětí indukované v cívce
V	objem, počet poloh (vrstev) cívky
\mathbf{v}	vektor rychlosti pohybu částice v magnetickém poli
V_{Cu}	objem mědi ve vinutí
W_m	energie magnetického pole
w_m	hustota energie magnetického pole
x, y, z, r	souřadnice
α	úhel
α_{th}	součinitel přestupu tepla
δ	odchylka indukčnosti
Δ	matematický operátor <i>Laplace</i>
ΔI	změna proudu protékajícího cívkou
ΔT	rozdíl teplot
Δt	změna času
$\Delta \Phi$	změna magnetického indukčního toku
λ_{in}	magnetická vodivost vnitřního úseku cívky
λ_{out}	magnetická vodivost vnějšího úseku cívky
λ_{th}	teplená vodivost
$\lambda_{tvzduch}$	tepelná vodivost vzduchu
μ	permeabilita
μ_0	permeabilita vakua
μ_r	relativní permeabilita materiálu
ρ_{Cu}	rezistivita mědi
σ_{Cu}	proudová hustota ve vodiči
τ	časová konstanta cívky
φ	fázový posun mezi napětím a proudem
Φ	magnetický indukční tok
Ψ	spřažený magnetický tok
Ω	označení definiční oblasti

Úvod

Tato práce je zaměřena na návrh vzduchové cívky s indukčností 6 mH. Návrh cívky je řešen pro trvalý harmonický proud s efektivní hodnotou 6,5 A tak, aby se cívka chladila pasivně, tzn. bez použití ventilace. Návrh je proveden pro válcovou i pravoúhlo dutinu kostry a je řešen s důrazem na minimalizaci rozměrů, resp. ceny cívky. Protože analytický výpočet indukčnosti je vždy zatížen určitou chybou, je provedena dodatečná kontrola indukčnosti metodou konečných prvků pomocí programu FEMM 4.2. Oteplení navržené cívky je opět kontrolováno metodou konečných prvků pomocí stejného programu. Pro výpočet oteplení jsou také uvedeny i analytické postupy. Na základě elektromagnetických a tepelných výpočtů bylo vyrobeno několik funkčních vzorků. U těchto vzorků byla změřena především vlastní indukčnost cívky a byla provedena oteplovací zkouška.

Text je rozdělen do šesti částí. První část se zabývá obecně metodikou návrhu vzduchových cívek. Jsou zde uvedeny potřebné úryvky z problematiky teorie elektromagnetického pole, přehled veličin potřebných pro popis elektromagnetického pole, základní popis myšlenky konkrétního postupu při návrhu a výsledné vztahy pro konečný výpočet indukčnosti vzduchových cívek. Druhá část textu je zaměřena na návrh konkrétní cívky a minimalizaci jejích rozměrů. Jedná se především o vhodnou volbu geometrických rozměrů cívky (vnitřní průměr, délka, počet závitů atd.) a o vhodnou volbu drátu, kterým bude zhotoveno vinutí cívky. Ve třetí části této práce budou vytvořeny vhodné modely pro ověřování indukčností navržených cívek metodou konečných prvků. Pro modelování bude využit volně stažitelný program FEMM 4.2. Ve čtvrté části této práce bude opět metodou konečných prvků ověřeno oteplení navržených cívek. V této části bude důležité vhodně určit a případně i odhadnout některé hodnoty parametrů ovlivňujících přenos tepla z vnitřku cívky k jejímu povrchu a následný přestup tepla do okolního vzduchu. Pátá část textu bude věnována výrobě a měření funkčních vzorků. Tato část je velmi důležitá. Mimo jiné se zde ukáže, zda výše popsané hodnoty byly odhadnuty úspěšně. V šesté části dojde ke shrnutí výsledků, porovnání vypočítaných hodnot s hodnotami změřenými na funkčních vzorcích a k jejich diskuzi. Výsledkem diskuze budou i případná doporučení ke zlepšení návrhu vzduchových cívek.

1 Metodika při návrhu vzduchové cívky

Při návrhu vzduchové cívky (tzn. cívky se vzduchovým jádrem) budeme za hlavní parametr cívky považovat její *vlastní indukčnost*. Existuje několik způsobů, jak z geometrických rozměrů cívky a materiálových vlastností určit její vlastní indukčnost. V této kapitole se seznámíme se základními veličinami potřebnými pro návrh cívky a se čtyřmi způsoby výpočtu indukčnosti.

1.1 Základní pojmy a veličiny elektromagnetického pole

Pro lepší orientaci v problematice návrhu vzduchových cívek zde uvedeme základní veličiny potřebné pro popis elektromagnetického pole a pojmy související s touto problematikou. Jak již bylo výše zmíněno, hlavním parametrem cívky je v tomto případě její vlastní indukčnost. Uvedeme tedy její definici a začneme od ní odvíjet definice dalších veličin a vztahy, kterými jsou tyto veličiny propojeny.

a) Vlastní indukčnost L

Podle [1] je vlastní indukčnost cívky konstantou úměrnosti mezi vzniklým magnetickým tokem Φ a proudem I , který jej budí:

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} \quad [H] \quad \text{kde:} \quad (1.1.1)$$

L je vlastní indukčnost [H],

N počet závitů cívky [-],

Φ magnetický indukční tok [Wb],

I budící proud tekoucí cívkou [A].

Podle [2] je definice vlastní indukčnosti rozdělena ještě do dvou částí - tzv. statickou a dynamickou. Je-li na vlastní indukčnost cívky pohlíženo jako na konstantu úměrnosti mezi magnetickým spřaženým tokem Φ a budícím proudem I , jedná se o statickou definici vlastní indukčnosti. Je-li na vlastní indukčnost cívky pohlíženo jako na konstantu úměrnosti mezi indukovaným napětím na cívce $u_i(t)$ a časovou změnou proudu $i(t)$, jedná se o dynamickou definici vlastní indukčnosti cívky.

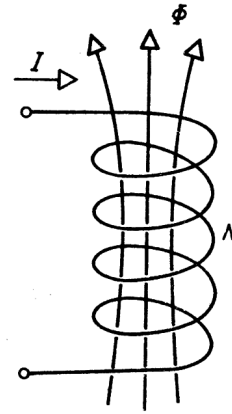
a) statická definice vlastní indukčnosti [2]

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad [H] \quad \text{kde:}$$

L je vlastní indukčnost [H],

Ψ spřažený magnetický tok [Wb],

I budící proud tekoucí cívkou [A].



(1.1.2)

b) dynamická definice indukčnosti [2]

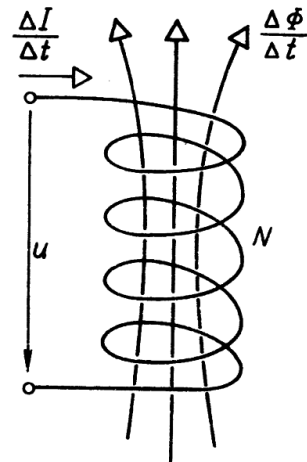
$$L = \frac{u}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} \quad [H] \quad \text{kde:}$$

L je vlastní indukčnost [H],

u napětí indukované v cívce [V],

ΔI změna proudu tekoucího cívkou [A],

Δt změna času [s].



(1.1.3)

Vlivem časové změny proudu cívky se rovněž mění magnetický tok v cívce a indukuje se napětí vlastní indukce [2]:

$$u = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad [V] \quad \text{nebo} \quad u = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [V] \quad \text{kde:} \quad (1.1.4)$$

u je napětí indukované v cívce [V],

N počet závitů cívky [-],

$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ časová změna magnetického indukčního toku [Wb/s],

L vlastní indukčnost [H],

$\frac{\Delta I}{\Delta t}$ časová změna proudu tekoucího cívkou [A/s].

b) Magnetický indukční tok Φ , spřažený magnetický tok Ψ

Magnetický indukční tok (značíme Φ) je tok vektoru magnetické indukce \mathbf{B} orientovanou plochou \mathbf{S} [3]. Jeho jednotkou je Weber [Wb].

$$\Phi = \int_{\mathbf{S}} \mathbf{B} d\mathbf{S} \quad [\text{Wb}] \quad [3], [4] \text{ kde:} \quad (1.1.5)$$

Φ je magnetický indukční tok [Wb],

\mathbf{B} magnetická indukce [T],

$d\mathbf{S}$ plocha, kterou prochází vektor magnetické indukce [m^2].

Je-li plocha \mathbf{S} kolmá k vektoru magnetické indukce \mathbf{B} , zjednoduší se vztah pro magnetický indukční tok na [5]:

$$\Phi = B \cdot S \quad [\text{Wb}] \quad (\text{jednotky jsou stejné jako v předchozím vztahu}). \quad (1.1.6)$$

Spřažený magnetický tok (značíme Ψ), který se vyskytuje v rovnici (1.1.2), odpovídá vztahu [6]:

$$\Psi \approx N \cdot \Phi \quad [\text{Wb}] \quad \text{kde:} \quad (1.1.7)$$

Ψ je spřažený magnetický tok [Wb],

N počet závitů cívky [-],

Φ magnetický indukční tok [Wb].

Uvedenou relaci mezi spřaženým magnetickým tokem Ψ a magnetickým indukčním tokem Φ je potřeba dodržovat tak, jak je uvedena. Ve velkém množství literatury se totiž objevuje relační symbol „je rovno“, což není pravda. I v případě, že budeme uvažovat ideálně navinutý solenoid, vykazuje vinutí určitý rozptyl. To znamená, že plochou, která je ohraničena jedním (např. krajním) závitem cívky, neprochází stejný magnetický indukční tok Φ jako třeba závitem, který se nachází u středu cívky. Potom říkáme, že jednotlivé závity cívky nezabírají se stejným magnetickým tokem.

c) Magnetická indukce B

Magnetickou indukci (značíme B) definujeme na základě silového působení magnetického pole na vodič, kterým prochází elektrický proud [2]. Jednotkou je Tesla [T].

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{F}}{Il} \quad [T] \quad \text{kde:} \quad (1.1.8)$$

B je vektor magnetické indukce [T],

F vektor síly působící na vodič [N],

I proud, který vodičem protéká [A],

l délka vodiče, na níž působí magnetické pole [m].

Obecněji lze definovat magnetickou indukci vztahem podle [3]:

$$\mathbf{F} = Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad [N] \quad \text{kde:} \quad (1.1.9)$$

F je vektor síly působící na částici pohybující se v magnetickém poli [N],

Q náboj částice pohybující se v magnetickém poli [C],

v vektor rychlosti pohybu částice v magnetickém poli [m/s],

B vektor magnetické indukce pole, které působí na částici [T].

d) Intenzita magnetického pole H

Intenzita magnetického pole (značíme H) je magnetické napětí připadající na jednotku délky indukční čáry, nebo-li spád magnetického napětí podél indukční čáry procházející místem, v němž intenzitu určujeme [7]. Jednotkou je [A/m].

$$H = \frac{F_m}{l} \quad [A/m] \quad \text{kde:} \quad (1.1.10)$$

H je velikost vektoru intenzity magnetického pole [A/m],

F_m magnetické napětí [A]

l délka indukční čáry [m].

e) Magnetické napětí F

Magnetické napětí (značíme F) podél libovolně uzavřené křivky obepínající vodič, jímž protéká elektrický proud, se rovná součtu celkového proudu procházejícího vodičem a časové změny elektrické indukce procházející uvnitř téže uvažované křivky. Časová změna elektrické indukce má často zanedbatelnou hodnotu oproti prvnímu členu rovnice, protože se jedná o jevy s malou časovou proměnlivostí. Můžeme potom uvažovat zjednodušený vztah pro magnetické napětí [8]. Jednotkou je [A].

$$F_m = I + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D}_n d\mathbf{S} \rightarrow F_m = I \quad [\text{A}] \quad \text{kde:} \quad (1.1.11)$$

F_m je magnetické napětí [A],

I proud protékající vodičem [A],

\mathbf{D}_n složka elektrické indukce kolmá na $d\mathbf{S}$ [C/m²],

$d\mathbf{S}$ element plochy ohraničené křivkou [m²].

Proud I dosazovaný v předchozích rovnicích je celkový proud procházející smyčkou. Kdyby šlo např. o cívku s N závitů a proudem v jednom závitě I_b , potom musíme vztah (1.1.11) upravit [8]:

$$F_m = I = N \cdot I_b \quad [\text{A}] \quad (1.1.12)$$

f) Materiálová konstanta (permeabilita) μ

Mezi magnetickou indukcí \mathbf{B} a intenzitou magnetického pole \mathbf{H} platí vztah [9]:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad [\text{T}] \quad \text{kde:} \quad (1.1.13)$$

\mathbf{B} je vektor magnetické indukce [T],

μ permeabilita magnetického pole [H/m],

\mathbf{H} vektor intenzity magnetického pole [A/m].

Pro stejnou látku je za stejných podmínek permeabilita stálá, proto je permeabilita materiálová konstanta. Závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole je nelineární. Je to dáno tím, že permeabilita látek se mění v závislosti na intenzitě magnetického pole. Permeabilita vakua (a přibližně i vzduchu) je

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ [H/m]} . \quad (1.1.14)$$

Častěji než permeabilitu používáme relativní permeabilitu μ_r . Udává, kolikrát menší nebo větší je permeabilita látky μ než permeabilita vakua [9]

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \text{ [-]} . \quad (1.1.15)$$

Relativní permeabilita vzduchu je $\mu_r = 1$. Proto v případě našeho návrhu cívky se vzduchovým jádrem můžeme rovnou do všech výpočtů dosazovat permeabilitu vakua.

1.2. Návrh válcové vzduchové cívky – Nagaoka

Podle [12] se již na přelomu 19. a 20. století začaly utvářet vztahy pro výpočet vlastních indukčností válcových cívek. Jednotlivé vztahy pro výpočty se však lišily podle geometrických rozměrů cívky – zejména podle její délky. Nagaoka zde uvádí nový způsob výhodnější pro praxi a experimentálně pracující fyziky. Zavádí tzv. Nagaokův koeficient, kterým se násobí vztah pro výpočet vlastní indukčnosti velmi dlouhé válcové cívky:

$$L = 4\pi n^2 \cdot S \cdot l \cdot 10^{-7} \text{ [H]} \text{ kde:} \quad (1.2.1)$$

L je vlastní indukčnost velmi dlouhé válcové cívky [H],

n počet závitů vztažený na jednotku délky [-/m],

S průřez cívky [m²],

l délka cívky [m].

Pro výpočet vlastní indukčnosti cívky téměř libovolných rozměrů přidal Nagaoka do rovnice (1.2.1) poslední člen K (Nagaokův koeficient), který pro různé geometrické rozměry cívek uvádí v tabulkách.

$$L = 4\pi n^2 \cdot S \cdot l \cdot K \cdot 10^{-7} \quad [H] \quad \text{kde:} \quad (1.2.2)$$

L je vlastní indukčnost cívky téměř libovolných rozměrů,

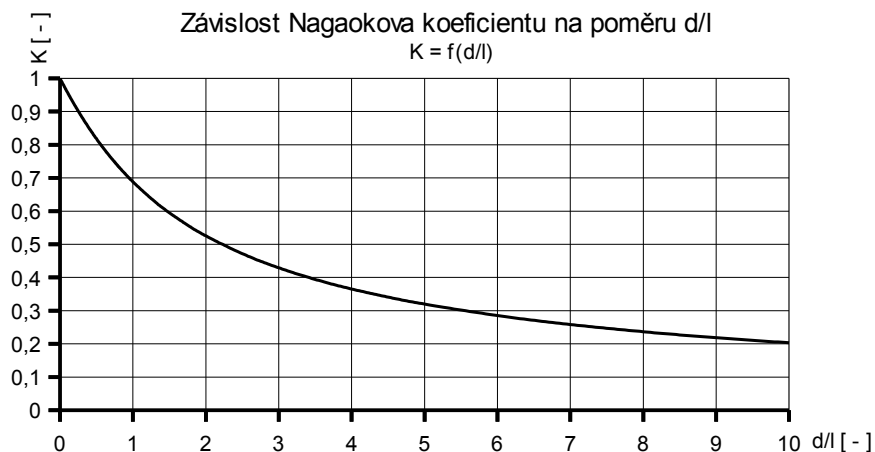
n počet závitů vztažený na jednotku délky,

S průřez cívky,

l délka cívky,

K Nagaokův koeficient.

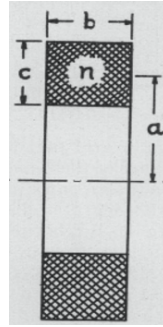
Pro praxi je nejvýhodnější použít tabulky, ve kterých je Nagaokův koeficient K uveden jako funkce poměru průměru d cívky a její délky l (ve [12] od strany 31). Nagaokův koeficient je v těchto tabulkách [12] uveden pro poměr od 0 do 10. Pro interval 0 – 1 je krok poměru 0,01, pro interval 1 – 2 je krok poměru 0,05, pro interval 2 – 5 je krok poměru 0,1 a pro interval 5 – 10 je krok poměru 0,5. Z uvedených tabulek je vybráno 25 hodnot, pro které je vytvořen graf uvedený na obrázku 1.2.1.



Obr. 1.2.1 Závislost Nagaokova koeficientu na poměru d/l

1.3. Návrh válcové vzduchové cívky – Wheeler

Empirický vztah formulovaný Wheelerem v roce 1928 byl inspirován vztahem prof. L. A. Hazeltina odvozeným pro vícevrstvou vzduchovou cívku o několik let dříve. Na obrázku 1.3.1 jsou uvedeny rozměry cívky pro dosazení do rovnice (1.3.1).



Obr. 1.3.1 Rozměry cívky pro výpočet podle Wheelera [13]

Rovnice (1.3.1) odpovídá vztahu pro výpočet vlastní indukčnosti vícevrstvé vzduchové válcové cívky tak, jak jej formuloval Wheeler (včetně jednotek).

$$L = \frac{0,8 a^2 n^2}{6a + 9b + 10c} \quad [\mu H] \quad \text{kde:} \quad (1.3.1)$$

L je vlastní indukčnost cívky [μH],

a střední poloměr cívky [palce],

n počet závitů [-],

b délka cívky [palce],

c tloušťka cívky [palce].

Provedeme převod na jednotky soustavy SI.

$$L = \frac{0,8 \cdot \left(\frac{a^2}{0,0254^2} \right) \cdot n^2}{6 \cdot \left(\frac{a}{0,0254} \right) + 9 \cdot \left(\frac{b}{0,0254} \right) + 10 \cdot \left(\frac{c}{0,0254} \right)} = \frac{\frac{0,8}{0,0254^2} \cdot a^2 \cdot n^2}{\frac{1}{0,0254} \cdot (6a + 9b + 10c)} \quad \text{kde:} \quad (1.3.2)$$

$$= \frac{0,8}{0,0254^2} \cdot \frac{a^2 n^2}{6a + 9b + 10c} = 31,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{a^2 n^2}{6a + 9b + 10c} \quad [H]$$

L je vlastní indukčnost cívky [H],

a střední poloměr cívky [m],

b délka cívky [m],

c tloušťka cívky [m],

n počet závitů cívky [-].

Literatura [13] udává přesnost rovnice (1.3.1) asi jedno procento. Podmínkou této přesnosti je tvar shodný s tvarem uvedeným na obrázku 1.3.1, což by mělo odpovídat tomu, že tři členy uvedené ve jmenovateli rovnice jsou zhruba stejně velké.

1.4. Návrh válcové vzduchové cívky – nomogram

Do nástupu výpočetní techniky v osmdesátých letech minulého století se téměř veškeré návrhy (a nejen cívek) řešily pomocí tzv. nomogramů. Podle [14] je nomogram graf, ze kterého lze vyčíst hodnoty funkcí, zvláště pak hodnoty funkcí více proměnných.

Nomogram pro návrh vícevrstvých válcových cívek z roku 1953 je převzat z [15] a uveden na obrázku 1.4.1. Vlastní indukčnost cívky je zde popsána vztahem

$$L = L_0 \cdot N^2 \cdot D \quad [\mu H ; -, -, cm] \quad \text{kde:} \quad (1.4.1)$$

L je vlastní indukčnost cívky [μH],

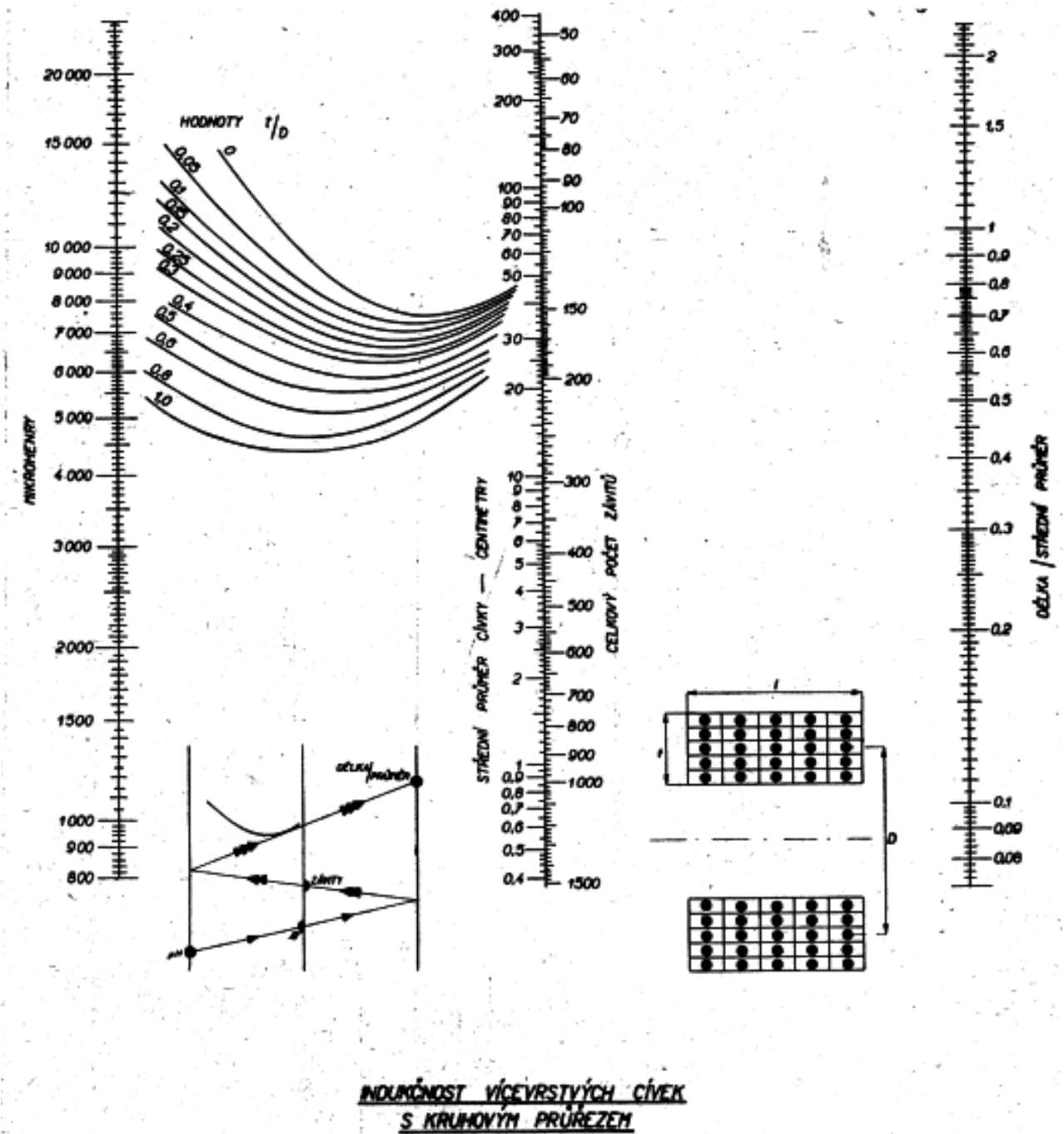
L_0 činitel závislý na poměru délky ke střednímu průměru i na poměru radiální tloušťky ke střednímu průměru [-],

N počet závitů cívky [-],

D střední průměr cívky [cm].

Poznámka: střední průměr je vnější průměr středního závitu bez průměru drátu. Délka je počet závitů v jedné vrstvě násobený osovou roztečí krajních vodičů. Tloušťka je počet vrstev násobený radiální roztečí.

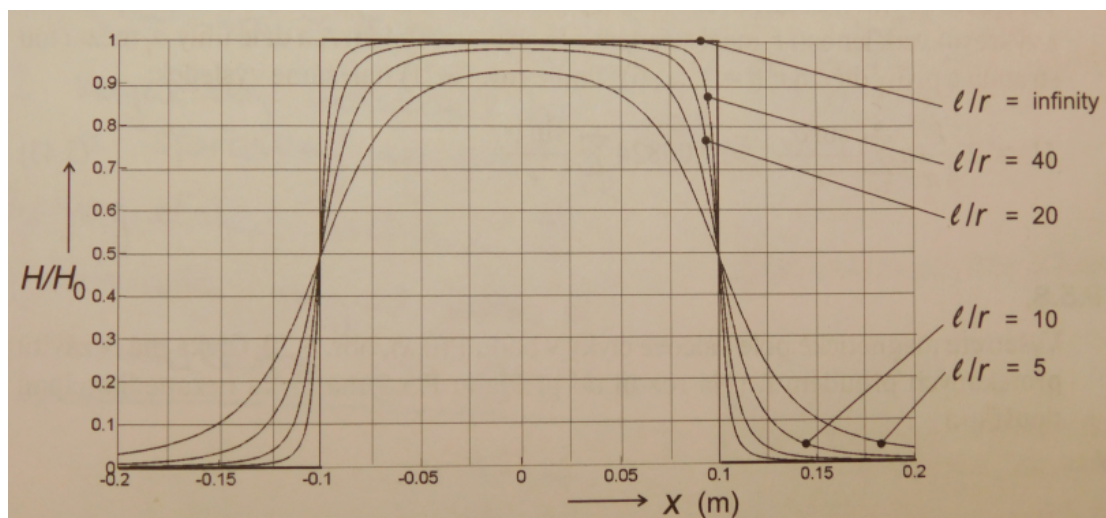
Součástí nomogramu je obrázek upřesňující rozměry definované v poznámce a návod k odečtu hodnot z nomogramu. V úvodu publikace [15] je deklarovaná přesnost při použití nomogramů asi 1 – 2%.



Obr. 1.4.1 Nomogram k určení vlastní indukčnosti vícevrstvé vzduchové cívky [15]

1.5. Návrh válcové vzduchové cívky – Mayer

Předchozí empirické vztahy jsou výhodné pro svoji jednoduchost a tedy i rychlost výpočtu. Jejich problém ale spočívá v tom, že téměř nerespektují geometrické rozměry cívky, pro kterou chceme vypočítat její vlastní indukčnost. Problém je v tom, že předchozí výpočty uvažovaly homogenní magnetické pole uvnitř cívky, což nerespektuje fyzikální realitu řešeného problému. Intenzita magnetického pole uvnitř cívky směrem k jejím okrajům klesá. Vně cívky potom intenzita magnetického pole není nulová, jak uvažuje výpočet. Při dodržení dostatečně velkého poměru délky a průměru cívky se lze k tomuto zjednodušení alespoň přiblížit. Vypočtený průběh intenzity magnetického pole v ose cívky je uveden na obrázku 1.5.1. Literatura [3] doporučuje poměr délky a průměru cívky větší než 40. Např. literatura [11] udává minimální poměr 5.



Obr. 1.5.1 Průběh intenzity magnetického pole v ose cívky [3]

Velmi přesný vztah pro výpočet intenzity magnetického pole a následně i vlastní indukčnosti cívky uvádí prof. Mayer v publikaci Aplikovaný elektromagnetismus [3]. Vztah pro výpočet je zde odvozen od Biot-Savartova zákona.

Biot-Savartův zákon [3]

V prostorově neohrazené definiční oblasti Ω , vyplněné magneticky homogenním a lineárním prostředím o permeabilitě $\mu = konst.$, je vodič o objemu V a s proudovou hustotou \mathbf{J} , viz obr. 1.5.2. Pro vektorový magnetický potenciál \mathbf{A} v oblasti Ω platí Poissonova rovnice:

$$\Delta A = -\mu \mathbf{J} \quad [\text{Wb/m}] \quad \text{kde:} \quad (1.5.1)$$

Δ je operátor Laplace,

A magnetický vektorový potenciál,

μ permeabilita prostředí [H/m],

\mathbf{J} proudová hustota [A/mm²].

Její partikulární řešení v obecném bodu $P \in \Omega$ je

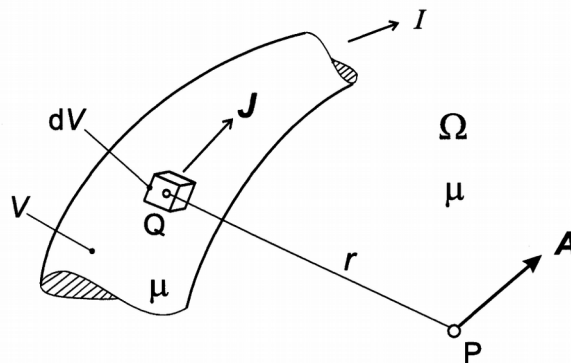
$$A(P) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}(Q)}{r} dV \quad [\text{Wb/m}], \quad A(\infty) = 0 \quad \text{kde:} \quad (1.5.2)$$

A je magnetický vektorový potenciál [Wb/m],

μ permeabilita prostředí [H/m],

\mathbf{J} proudová hustota v bodu $Q \in V$ [A/mm²],

r vzdálenost mezi objemovým elementem dV (bod Q) a bodem P [m].



Obr. 1.5.2 K integrálnímu výrazu pro A a pro \mathbf{H} masivního vodiče [3]

Nyní určíme řešení pro intenzitu magnetického pole \mathbf{H} . Stavový vektor $\mathbf{H}(P)$ můžeme vyjádřit přímo z vektorového potenciálu A podle rovnice (1.5.2):

$$\mathbf{H}(P) = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}(Q) \times \mathbf{r}}{r^3} dV \quad [\text{A/m}] \quad \text{kde:} \quad (1.5.3)$$

\mathbf{H} je vektor intenzity magnetického pole v bodě P [A/m],

\mathbf{J} proudová hustota v bodu $Q \in V$ [A/mm²],

r vzdálenost mezi objemovým elementem dV (bod Q) a bodem P [m].

Podrobnější odvození vztahu (1.5.3) je uvedeno v [3]. Masivní vodič o objemu V nahradíme tenkým vodičem, jenž má tvar křivky l a je protékán proudem I - viz obr. 1.5.3. Přejdem $\mathbf{J}dV \rightarrow I d\mathbf{l}$ dostáváme z rovnice (1.5.2) rovnici

$$\mathbf{A} = \frac{\mu I}{4\pi} \int_l \frac{d\mathbf{l}}{r} \quad [\text{Wb/m}], \quad \mathbf{A}(\infty) = 0 \quad \text{kde:} \quad (1.5.4)$$

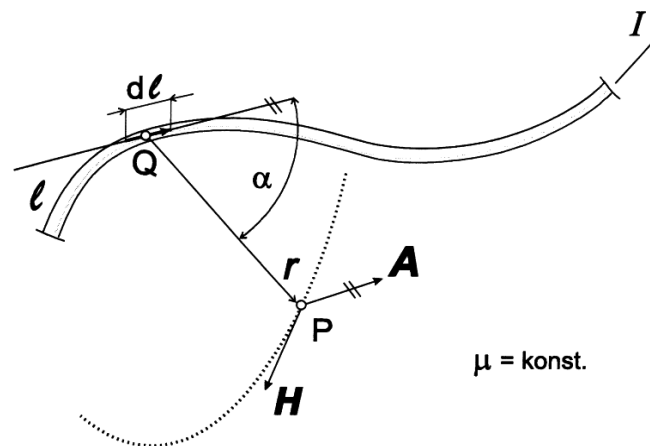
\mathbf{A} je magnetický vektorový potenciál [Wb/m],

μ permeabilita prostředí [H/m],

I proud procházející vodičem [A],

$d\mathbf{l}$ délkový element [m],

r vzdálenost mezi délkovým elementem $d\mathbf{l}$ (bod Q) a bodem P [m].



Obr. 1.5.3 K Biot – Savartovu zákonu [3]

Opět ještě určíme vztah pro intenzitu magnetického pole:

$$\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi} \int_l \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad [\text{A/m}] \quad \text{kde:} \quad (1.5.5)$$

\mathbf{H} je intenzita magnetického pole [A/m],

I proud protékající vodičem [A],

$d\mathbf{l}$ délkový element [m],

r vzdálenost mezi délkovým elementem $d\mathbf{l}$ (bod Q) a bodem P [m].

Rovnice (1.5.5) se nazývá Biot-Savartův zákon. Dalšího zjednodušení vztahu docílíme uvažováním tenkého vodiče. Necht' tenký vodič tvaru křivky l , protékáný proudem I , leží v rovině (x,y) . Uvážíme-li geometrické rozložení magnetického pole, zjistíme, že vektor magnetické intenzity \mathbf{H} je k této rovině (x,y) kolmý, $\mathbf{H} = \mathbf{k}H$. Postačí tedy vypočítat pouze velikost vektoru \mathbf{H} . Z Biot-Savartova zákona podle rovnice (1.5.5) dostáváme [3]

$$H = \frac{I}{4\pi} \int_l \frac{\sin(\alpha)}{r^2} dl \quad [A/m] \quad \text{kde:} \quad (1.5.6)$$

H je velikost intenzity magnetického pole ve směru kolmém na rovinu (x,y) [A/m],

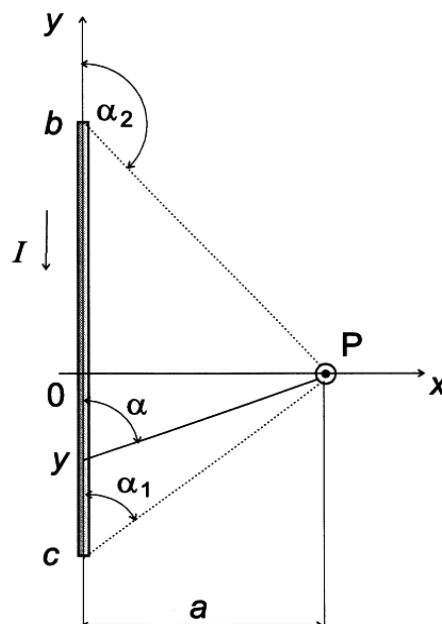
I proud protékající vodičem [A],

α úhel mezi délkovým elementem $d\mathbf{l}$ a spojnicí bodů P a Q [rad],

r vzdálenost mezi body P a Q [m].

Nyní se pomocí tří příkladů a jejich řešení z [3] dostaneme až ke konečnému řešení vlastní indukčnosti válcové cívky se vzduchovým jádrem.

V prvním příkladu určíme intenzitu magnetického pole \mathbf{H} úseku přímého tenkého vodiče protékaného proudem I („proudové úsečky“, obr. 1.5.5.



Obr. 1.5.5 K prvnímu příkladu [3]

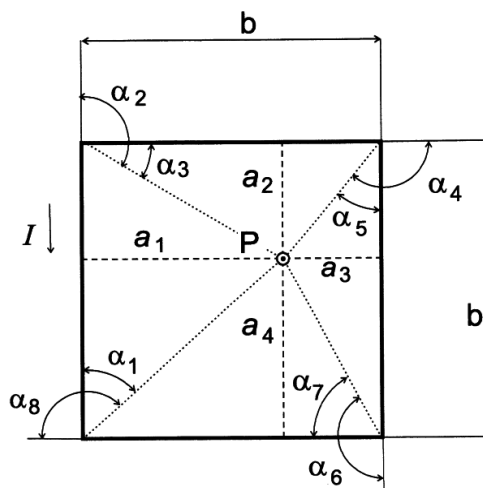
Proudovodič leží v rovině (x,y) , $\mathbf{H} = kH_z$, použijeme rovnici (1.5.6). Integrovaná funkce obsahuje tři proměnné: α , r , y . Vyjádříme ji jako funkci jedné proměnné, např. α . Použijeme k tomu vztahy:

$$\sin(\alpha) = \frac{a}{r} \rightarrow r = \frac{a}{\sin(\alpha)} \quad (1.5.7)$$

$$\cotg(\alpha) = \frac{y}{a} \rightarrow y = a \cdot \cotg(\alpha) \rightarrow dy = \frac{a}{\sin^2(\alpha)} d\alpha \quad (1.5.8)$$

$$H = \frac{I}{4\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\sin(\alpha)}{r^2} d\alpha = \frac{I}{4\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\sin(\alpha)}{\left(\frac{a}{\sin(\alpha)}\right)^2} \frac{a}{\sin^2(\alpha)} d\alpha = \frac{I}{4\pi a} [\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2)] \quad [A/m] \quad (1.5.9)$$

Ve druhém příkladu se zabýváme čtvercovým závitem z tenkého drátu, kterým protéká proud I . Určeme intenzitu magnetického pole \mathbf{H} v obecném bodu P ležícím v rovině závitu, obr. 1.5.6.

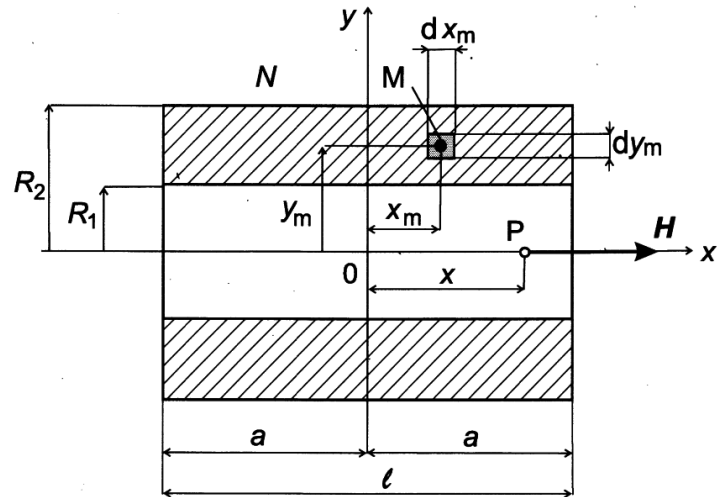


Obr. 1.5.6 K druhému příkladu [3]

S použitím rovnice (1.5.9) dostáváme výsledek:

$$\mathbf{H} = kH, \quad H = \frac{I}{4\pi} \sum_{i=1}^4 \frac{\cos(\alpha_{2i-1}) - \cos(\alpha_{2i})}{a_i} \quad [A/m] \quad (1.5.10)$$

Ve třetím příkladu vyšetřujeme magnetické pole válcové cívky v bodu $P(0,x)$, obr. 1.5.7. Cívka má N závitů protékaných proudem I . Cívka má nezanedbatelnou tloušťku.



Obr. 1.5.7 Ke třetímu příkladu [3]

Cívku rozložíme na elementární tenké souosé prstence o průřezu dS . Každý prstenec má elementární průřez dS s bodem M . Prstenec má $\left[\frac{dS}{2a(R_2 - R_1)} N \right]$ závitů a indukuje intenzitu magnetického pole $dH(P)$. Podle rovnice (1.5.10) integrací dostaneme magnetickou intezitu celé cívky:

$$\begin{aligned}
 H(P) &= \frac{NI}{4a(R_2 - R_1)} \int_{R_1 - a}^{R_2} \int_{-a}^a \frac{y_m^2 dx_m dy_m}{\sqrt{[(x - x_m)^2 + y_m^2]^3}} = \\
 &= \frac{NI}{4a(R_2 - R_1)} \left[(x + a) \ln \left(\frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (x + a)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x + a)^2}} \right) - (x - a) \ln \left(\frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (x - a)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x - a)^2}} \right) \right] [A/m]
 \end{aligned}
 \tag{1.5.11}$$

Jestliže známe intenzitu magnetického pole celé cívky, můžeme nyní podle [10] určit hustotu magnetického pole uvnitř cívky.

$$w_m = \int_{\delta}^B \mathbf{H} d\mathbf{B} [J/m^3] \quad \text{kde:} \tag{1.5.12}$$

w_m je hustota energie magnetického pole $[J/m^3]$,

δ, B integrační meze $[T]$,

$d\mathbf{B}$ element magnetické indukce $[T]$.

Pro $\mu = konst.$ se integrální vztah zjednoduší a můžeme pro výpočet použít rovnice [10]:

$$w_m = \frac{1}{2} B H = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \quad [J/m^3] \quad \text{kde:} \quad (1.5.13)$$

w_m je hustota energie magnetického pole [J/m^3],

B velikost magnetické indukce [T],

H velikost intenzity magnetického pole [A/m],

μ permeabilita prostředí [H/m].

V dalším kroku z hustoty energie magnetického pole určíme energii magnetického pole akumulovanou v cívce. Použijeme vztah [10]:

$$W_m = \int_V w_m dV = \frac{1}{2} \int_V H B dV \quad [J] \quad \text{kde:} \quad (1.5.14)$$

W_m je energie magnetického pole akumulovaného v cívce [J],

w_m hustota energie magnetického pole [J/m^3],

dV element objemu [m^3],

H intenzita magnetického pole uvnitř cívky [A/m],

B magnetická indukce uvnitř cívky [T].

Pro homogenní magnetické pole (tzn. že hustota magnetické energie je v uvažovaném objemu rozložena rovnoměrně) můžeme rovnici (1.5.14) zjednodušit na [7]

$$W_m = w_m V = \frac{1}{2} B H V \quad [J] \quad \text{kde:} \quad (1.5.15)$$

W_m je energie magnetického pole akumulovaného v cívce [J],

w_m hustota energie magnetického pole [J/m^3],

V objem uvažovaného magnetického pole [m^3]

H intenzita magnetického pole uvnitř cívky [A/m],

B magnetická indukce uvnitř cívky [T].

Zavedeme jiný vztah pro výpočet energie magnetického pole akumulovaného v cívce [2]. Pro vytvoření magnetického toku musí elektrický proud vykonat práci. V prostoru okolo vodiče i v samotném vodiči se nahromadí určitá energie. Tato energie je potřebná k vytvoření magnetického pole a zůstává v něm obsažena. Pro energii magnetického pole cívky potom platí následující vztah:

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 \quad [J] \quad \text{kde:} \quad (1.5.16)$$

W_m je energie magnetického pole akumulovaného v cívce [J],

L vlastní indukčnost cívky [H],

I proud protékající cívkou [A].

Nyní již stačí vyjádřit vlastní indukčnost cívky z rovnice (1.5.16) a za energii magnetického pole akumulovaného v cívce dosadit energii z rovnic (1.5.15) a (1.5.13). Dostáváme výslednou rovnici pro vlastní indukčnost cívky s využitím vztahů a odvození podle [3]:

$$L = \frac{2 W_m}{I^2} = \frac{2 w_m V}{I^2} = \frac{2 \cdot \frac{1}{2} \mu H^2 V}{I^2} = \frac{\mu H^2 V}{I^2} \quad [H] \quad \text{kde:} \quad (1.5.17)$$

L je vlastní indukčnost cívky [H],

W_m energie magnetického pole akumulovaného v cívce [J],

I proud procházející cívkou [A],

w_m hustota energie magnetického pole [J/m^3],

V objem uvažovaného magnetického pole [m^3],

μ permeabilita prostředí [H/m],

H intenzita magnetického pole uvnitř cívky (z rovnice 1.5.11) [A/m].

1.6. Návrh vzduchové válcové cívky – Patočka

V této kapitole se dostáváme k nejznámějšímu vztahu pro výpočet vlastní indukčnosti cívky [1, 2, 7, 16, ...] i ke dvěma způsobům jeho odvození [11]. Dále se v této kapitole zaměříme na optimalizaci návrhu cívky a dvě možná kritéria návrhu. Cívku totiž můžeme navrhovat pro jmenovitou indukčnost a jmenovitý proud, nebo jmenovitý činný odpor, máme-li zadaný činitel jakosti Q .

$$L = \frac{N^2}{R_m} [H] \quad \text{kde:} \quad (1.6.1)$$

L je vlastní indukčnost cívky [H],

N počet závitů cívky [-],

R_m magnetický odpor jádra cívky, pro který platí

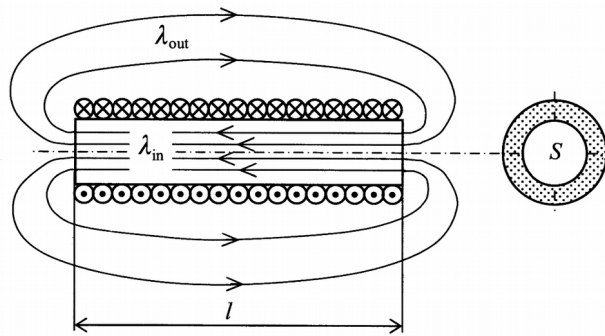
$$R_m = \frac{l}{\mu S} [H^{-1}] \quad \text{kde:} \quad (1.6.2)$$

l je délka cívky [m],

μ permeabilita jádra cívky [H/m],

S průřez jádra cívky [m²].

Oba způsoby odvození budou vycházet z následujících předpokladů a obrázku 1.6.1. Uvažujeme dlouhou relativně štíhlou cívku se vzduchovým jádrem. Magnetický obvod cívky je možno rozdělit na dva úseky. První úsek je uvnitř cívky, kde je magnetické pole homogenní, a lze tedy snadno určit jeho magnetickou vodivost λ_{in} . Druhý úsek uvažujeme vně cívky, kde je magnetické pole nehomogenní, proto nelze přesně určit jeho magnetickou vodivost λ_{out} . Lze ale dokázat, že při rostoucí délce cívky do nekonečných hodnot ($l \rightarrow \infty$) roste hodnota magnetické vodivosti λ_{out} nade všechny meze. Magnetické vodivosti obou úseků jsou totiž zapojeny sériově, tzn. bude-li vodivost vnějšího úseku λ_{out} řádově vyšší, lze ji zanedbat. Potom je výsledná vodivost magnetického obvodu určena pouze malou magnetickou vodivostí vnitřního úseku λ_{in} . Vlastní indukčnost dlouhé cívky lze potom odvodit dvěma způsoby.



Obr. 1.6.1 K odvození indukčnosti dlouhého solenoidu [11]

První způsob odvození [11]

První způsob odvození vychází z přibližné rovnice (1.1.7) pro výpočet spřaženého magnetického toku. Je-li solenoid dostatečně dlouhý, je magnetické pole uvnitř cívky homogenní a lze psát vztah

$$L I = \Psi \approx N \Phi = NSB = NS \mu_0 H = NS \mu_0 \frac{NI}{l} \quad \text{kde:} \quad (1.6.3)$$

L je vlastní indukčnost cívky [H],

I proud protékající cívkou [A],

Ψ magnetický indukční tok spřažený s cívkou [Wb],

N počet závitů cívky [-],

Φ magnetický indukční tok vybuzený cívkou [Wb],

S průřez cívky [m²],

B magnetická indukce uvnitř cívky [T],

μ_0 permeabilita vakua [H/m],

H intenzita magnetického pole [A/m],

l délka cívky [m].

Z prvního a posledního výrazu rovnice (1.6.3) lze po vydělení proudem I psát vztah pro velikost vlastní indukčnosti

$$L = N^2 \mu_0 \frac{S}{l} \quad [H] \quad \text{kde:} \quad (1.6.4)$$

L je vlastní indukčnost cívky [H],

N počet závitů cívky [-],

μ_0 permeabilita vakua [H/m],

S průřez cívky [m²],

l délka cívky [m].

S využitím rovnice (1.6.2) pro magnetický odpor dostáváme původní rovnici pro velikost vlastní indukčnosti cívky, rovnici (1.6.1). Rovnice je dostatečně přesná pouze pro dlouhé štíhlé cívky – viz úvod kapitoly 1.5. V literatuře je ještě uvedena zmínka (podložená výpočtem), že vnitřní magnetický indukční tok je rovnoběžný s osou cívky a nezávislý na délce cívky l . Za tohoto předpokladu vystupuje magnetický tok Φ do vnějšího prostoru *pouze* oběma konci cívky. Magnetický tok musí téci po uzavřené dráze, což znamená, že vnější tok uzavírající se vnějšími vzdušnými cestami musí mít stejnou hodnotu jako tok uvnitř cívky. Z toho vyplývá, že hodnota vnějšího magnetického toku je také nezávislá na délce cívky l . Není tedy pravda, že vnější magnetický tok nekonečně dlouhé cívky je nulový. Nulová může být plošná hustota vnějšího magnetického toku, což je magnetická indukce B .

Druhý způsob odvození [11]

Při tomto postupu odvození uvažujeme celkovou magnetickou vodivost λ_m . Jestliže ji opět rozdělíme na magnetickou vodivost vnitřního úseku (λ_{in}) a vnějšího úseku (λ_{out}) dostaneme:

$$L = N^2 \lambda_m = N^2 \frac{\lambda_{in} \lambda_{out}}{\lambda_{in} + \lambda_{out}} = N^2 \lambda_{in} \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{in}}{\lambda_{out}}} = N^2 \mu_0 \frac{S}{l} \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{in}}{\lambda_{out}}} \quad [H] \quad \text{kde:} \quad (1.6.5)$$

L je vlastní indukčnost cívky [H],
 N počet závitů cívky [-],
 λ_m celková magnetická vodivost magnetického obvodu cívky [H],
 λ_{in} magnetická vodivost vnitřního úseku mg. obvodu cívky [H],
 λ_{out} magnetická vodivost vnějšího úseku mg. obvodu cívky [H],
 μ_0 permeabilita vakua [H/m],
 S průřez cívky [m²],
 l délka cívky [m].

Při myšlenkovém experimentu nyní prodloužíme cívku k -krát, tj. z hodnoty l na hodnotu kl . Vodivost λ_{in} vnitřního úseku (prostoru) potom klesne na hodnotu

$$\lambda_{in} = \mu_0 \frac{S}{kl} \quad [H] \quad \text{kde:} \quad (1.6.6)$$

λ_{in} je magnetická vodivost vnitřního úseku mg. obvodu cívky [H],
 μ_0 permeabilita vakua [H/m],
 S průřez cívky [m²],
 kl zvětšená délka cívky [m].

Vodivost λ_{out} vnějšího úseku magnetického obvodu cívky pak bude úměrná výrazu

$$\lambda_{out} \simeq \mu_0 \frac{k^2 l^2}{kl} \simeq \mu_0 kl \quad [H] \quad \text{kde:} \quad (1.6.7)$$

λ_{out} je magnetická vodivost vnějšího úseku mg. obvodu cívky [H],
 μ_0 permeabilita vakua [H/m],
 k koeficient zvětšení délky cívky [-],
 l délka cívky [m].

Je to dáno tím, že všechny lineární rozměry vnějšího úseku magnetického obvodu cívky rostou s první mocninou k , proto plošný průřez téže cesty roste s druhou mocninou k . Z rovnic (1.6.6) a (1.6.7) plyne:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lambda_{in}}{\lambda_{out}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{S}{k^2 l^2} = 0 \quad \text{kde:} \quad (1.6.8)$$

λ_{in} je magnetická vodivost vnitřního úseku mg. obvodu cívky [H],

λ_{out} magnetická vodivost vnějšího úseku mg. obvodu cívky [H],

S průřez cívky [m²],

k koeficient zvětšení délky cívky [-],

l délka cívky [m].

To ovšem znamená, že hodnota složeného zlomku v rovnici (1.6.5) se v případě hodně dlouhých cívek limitně blíží jedné a výsledek je pak stejný jako v případě rovnice (1.6.4). Převrácená rovnice (1.6.8) má tvar

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lambda_{out}}{\lambda_{in}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k^2 l^2}{S} \rightarrow \infty \quad \text{kde:} \quad (1.6.9)$$

λ_{out} magnetická vodivost vnějšího úseku mg. obvodu cívky [H],

λ_{in} je magnetická vodivost vnitřního úseku mg. obvodu cívky [H],

k koeficient zvětšení délky cívky [-],

l délka cívky [m],

S průřez cívky [m²].

Je zřejmé, že s rostoucí délkou cívky kl neustále roste hodnota magnetické vodivosti vnějšího úseku magnetického obvodu cívky λ_{out} . Tím je možné vysvětlit, proč u nekonečně dlouhé cívky limitně klesá vnější magnetické pole \mathbf{H} , resp. \mathbf{B} na nulu. Obě vodivosti jsou totiž zapojeny do série, přičemž se celé magnetické napětí NI objeví na malé magnetické vodivosti vnitřního úseku λ_{in} , kdežto nekonečně velká magnetická vodivost vnějšího úseku λ_{out} tvoří magnetický zkrat, na němž je magnetické napětí nulové.

V závěru této teoretické kapitoly uvádí Patočka ještě několik poznatků:

- Vnitřní magnetický tok Φ cívky je konstantní a nenulový při libovolné délce cívky, tedy i při nekonečné délce. Proto musí být konstantní a nenulový i vnější tok libovolně dlouhé cívky, opět i při nekonečné délce.

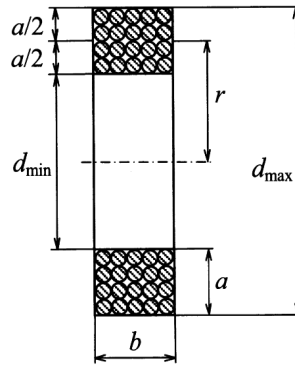
- Nulová může být pouze plošná hustota tohoto vnějšího toku neboli vnější magnetická indukce B , tedy i vnější intenzita magnetického pole H , ale *pouze* v limitním případě nekonečně dlouhé cívky.
- Má-li cívka konečnou délku – a to má v praxi vždy, pak intenzita magnetického pole H ani magnetická indukce B vnějšího pole cívky *nemůže být nulová*.

Dále Patočka uvádí vztahy pro výpočty indukčností cívek jednovrstvých, toroidních, Helmholtzových a sendvičových. Některé vychází ze zde již uvedených vztahů publikovaných Nagaokou a Wheelerem nebo z již také uvedeného Biot-Savartova zákona. Pro zde řešený návrh cívky je nejzajímavější kapitola 16.6 – Kotoučová vzduchová cívka [11], jejíž podkapitolou je např. minimalizace kotoučové cívky.

Kotoučová vzduchová cívka podle obrázku 1.6.2 má velký význam ve všech případech, kdy nelze použít tlumivku s feromagnetickým jádrem a vzduchovou mezerou z důvodu velkých vířivých a hysterezních ztrát ve feromagnetiku [11].

Dalším důvodem je fakt, že feromagnetikum nemá konstantní permeabilitu μ_r . To se projevuje nelineárním průběhem magnetizační křivky a tím, že při dosažení určité intenzity magnetického pole dojde k tzv. nasycení materiálu a magnetická indukce dál neroste. Linearitu B - H charakteristiky vyžadujeme například u cívek používaných k různým měřením, kde by cívka s feromagnetickým jádrem šla používat jen ve velmi malém rozsahu hodnot intenzity magnetického pole H .

Patočka uvádí postup minimalizace vzduchové kotoučové cívky, který vychází z již uvedeného vztahu publikovaného Wheelerem – rovnice (1.3.2). Tento vztah je vhodný pro minimalizační výpočty, protože jeho koeficienty jsou konstantní. Wheelerův vztah je zde ještě jednou uveden z důvodu větší přehlednosti, jako rovnice (1.6.10), s již upravenými koeficienty tak, aby platil pro SI jednotky.



Obr. 1.6.2 Kotoučová vzduchová cívka [11]

Wheelerův vztah se značením rozměrů odpovídající obrázku 1.6.2:

$$L = 3,15 \cdot 10^{-5} \frac{N^2 r^2}{6r + 9b + 10a} \quad [H; -, m, m, m] \quad \text{kde:} \quad (1.6.10)$$

L je vlastní indukčnost cívky [H],

N počet závitů cívky [-],

r střední poloměr cívky [m],

b délka cívky [m],

a tloušťka cívky [m].

Zadání návrhu cívky může být definováno dvěma způsoby. Můžeme mít zadanou vlastní indukčnost cívky L a trvalý efektivní proud I_{ef} , při kterém se musí cívka svým povrchem uchladiť. Takto je zadána i cívka, jejíž návrh je předmětem této práce. Způsob zadání je typický pro výkonové tlumivky. Druhým způsobem je možnost, kdy máme zadanou vlastní indukčnost cívky L a odpor vinutí R_{cu} . Tento způsob je typický spíše pro tlumivky nevýkonové, kde je na odporu vinutí závislá jakost tlumivky, příp. účinnost celého zařízení s tlumivkou. Podle dále uvedených rovnic budeme schopni navrhnout rozměry cívky tak, abychom při minimálním objemu mědi ve vinutí dosáhli maximální vlastní indukčnosti cívky. Budeme tedy hledat optimální poměry rozměrů a , b , d_{min} , d_{max} .

Následuje absolutní minimalizace kotoučové cívky [11]. Mezi proudovou hustotou a proudem platí vztah:

$$S_{Cu} = \frac{I_{ef}}{\sigma_{Cu}} \quad [m^2] \quad \text{kde:} \quad (1.6.11)$$

S_{Cu} je průřez drátu vinutí [m^2],

I_{ef} efektivní hodnota proudu, pro který má být vinutí navrženo [A],

σ_{Cu} proudová hustota [A/m^2].

Dále musí platit rovnice pro činitel plnění vinutí:

$$k_p = \frac{NS_{Cu}}{ab} = \frac{V_{Cu}}{V} \quad [-] \quad \text{kde:} \quad (1.6.12)$$

k_p je činitel plnění vinutí [-],

N počet závitů [-],

S_{Cu} průřez drátu vinutí [m^2],

a tloušťka cívky [m],

b délka cívky [m],

V_{Cu} objem mědi vinutí [m^3],

V objem celého vinutí i s impregnantem [m^3].

Délka vodiče (drátu) je dána rovnicí

$$l_{Cu} = N O_{stř} = 2 \pi N r \quad [m] \quad \text{kde:} \quad (1.6.13)$$

l_{Cu} je celková délka vodiče (drátu) [m],

N počet závitů cívky [-],

$O_{stř}$ střední obvod cívky [m],

r střední poloměr cívky [m].

Umocněním a úpravou rovnice (1.6.13) získáme pomocnou rovnici

$$N^2 r^2 = \frac{l_{Cu}^2}{4\pi^2} \quad [m^2] \quad \text{kde:} \quad (1.6.14)$$

l_{Cu} je celková délka vodiče (drátu) [m],

N počet závitů cívky [-],

$O_{stř}$ střední obvod cívky [m],

r střední poloměr cívky [m].

Objem vinutí lze určit podle velice jednoduchého vztahu:

$$V = 2\pi r a b \quad [m^3] \quad \text{kde:} \quad (1.6.15)$$

V je celkový objem vinutí včetně impregnantu [m³],

r střední poloměr cívky [m],

a tloušťka cívky [m],

b délka cívky [m].

Objem samotné mědi ve vinutí je:

$$V_{Cu} = l_{Cu} \cdot S_{Cu} \quad [m^3] \quad \text{kde:} \quad (1.6.16)$$

V_{Cu} je objem samotné mědi ve vinutí [m³],

l_{Cu} délka vodiče (drátu) [m],

S_{Cu} průřez vodiče (drátu) [m²].

Ze sloučení a úprav rovnic (1.6.12), (1.6.15) a (1.6.16) vyplývá:

$$r = \frac{V}{2\pi ab} = \frac{l_{Cu} S_{Cu}}{2\pi k_p ab} \quad [m] \quad \text{kde:} \quad (1.6.17)$$

r je střední poloměr cívky [m],

V celkový objem vinutí včetně impregnantu [m³],

a tloušťka cívky [m],

b délka cívky [m],

l_{Cu} délka vodiče (drátu) [m],

S_{Cu} průřez vodiče (drátu) [m²],

k_p činitel plnění vinutí [-].

Z obrázku 1.6.2 je zřejmé, že musí být splněna nerovnost

$$r \geq \frac{a}{2} \quad [m] \quad \text{kde:} \quad (1.6.18)$$

r je střední poloměr cívky [m],

a tloušťka cívky [m].

Nyní rovnice (1.6.14) a (1.6.17) dosadíme do rovnice (1.6.10). Tím docílíme toho, že z rovnice (1.6.10) vyloučíme střední poloměr r a počet závitů cívky N a vlastní indukčnost kotoučové cívky bude pouze 2D funkcí proměnných a a b , tedy $L = f(a, b)$.

$$L(a, b) = \frac{3,15 \cdot 10^{-5}}{2\pi} \frac{k_p l_{Cu}^2 ab}{6l_{Cu} S_{Cu} + 18\pi k_p ab^2 + 20\pi k_p a^2 b} \quad [H] \quad \text{kde:} \quad (1.6.19)$$

$L(a, b)$ je vlastní indukčnost cívky v závislosti na rozměrech a a b [H],

k_p činitel plnění vinutí [-],

l_{Cu} délka vodiče (drátu) [m],

a tloušťka cívky [m],

b délka cívky [m],

S_{Cu} průřez vodiče (drátu) [m²].

Dále je nutné nalézt absolutní maximum této funkce. Určíme proto parciální derivace funkce popsané rovnicí (1.6.19) podle proměnných a a b a obě derivace položíme rovny nule:

$$\frac{\partial L(a, b)}{\partial a} = 0; \quad \frac{\partial L(a, b)}{\partial b} = 0 \quad (1.6.20a, b)$$

Tímto jsme získali soustavu dvou algebraických rovnic (1.6.20) o dvou neznámých a a b . Vyřešením této soustavy rovnic určíme polohu maxima funkce popsanou rovnicí (1.6.19). Řešením je:

$$a = 0,441 \sqrt[3]{\frac{l_{Cu} S_{Cu}}{k_p}} \quad [m]; \quad b = 0,49 \sqrt[3]{\frac{l_{Cu} S_{Cu}}{k_p}} \quad [m] \quad \text{kde:} \quad (1.6.21a, b)$$

- a je tloušťka cívky [m],
 b délka cívky [m],
 l_{Cu} délka vodiče (drátu) [m],
 S_{cu} průřez vodiče (drátu) [m²],
 k_p činitel plnění vinutí [-].

Po dosazení rovnic (1.6.21a, b) do rovnice (1.6.17) získáme velikost středního poloměru cívky:

$$r = 0,736 \sqrt[3]{\frac{l_{Cu} S_{Cu}}{k_p}} \quad [m] \quad \text{kde:} \quad (1.6.22)$$

- r je střední poloměr cívky [m],
 l_{Cu} délka vodiče (drátu) [m],
 S_{cu} průřez vodiče (drátu) [m²],
 k_p činitel plnění vinutí [-].

Vnitřní průměr cívky pak bude mít velikost:

$$d_{min} = 2 \left(r - \frac{a}{2} \right) = 2r - a = 1,031 \sqrt[3]{\frac{l_{Cu} S_{Cu}}{k_p}} \quad [m] \quad \text{kde:} \quad (1.6.23)$$

- d_{min} je vnitřní průměr cívky [m],
 r střední poloměr cívky [m],
 a tloušťka cívky [m],
 l_{Cu} délka vodiče (drátu) [m],
 S_{cu} průřez vodiče (drátu) [m²],
 k_p činitel plnění vinutí [-].

Vnější průměr cívky pak bude mít velikost:

$$d_{max} = 2 \left(r + \frac{a}{2} \right) = 2r + a = 1,913 \sqrt[3]{\frac{l_{Cu} S_{Cu}}{k_p}} \quad [m] \quad \text{kde:} \quad (1.6.24)$$

d_{max} je vnitřní průměr cívky [m],
 r střední poloměr cívky [m],
 a tloušťka cívky [m],
 l_{Cu} délka vodiče (drátu) [m],
 S_{cu} průřez vodiče (drátu) [m²],
 k_p činitel plnění vinutí [-].

Vnitřní průměr d_{min} budeme považovat za základní rozměr, protože se jedná o průměr navíjecího trnu. Všechny ostatní rozměry potom vyjádříme jako násobky vnitřního průměru:

$$a : b : r : d_{max} : d_{min} = 0,428 : 0,475 : 0,714 : 1,855 : 1 \quad \text{kde:} \quad (1.6.25)$$

a je tloušťka cívky [m],
 b délka cívky [m],
 r střední poloměr cívky [m],
 d_{max} vnější průměr cívky [m],
 d_{min} vnitřní průměr cívky [m].

Tímto je optimalizace návrhu kotoučové cívky dokončena a cívka bude mít při uvedených poměrech rozměrů maximální vlastní indukčnost při minimálním objemu mědi.

Nyní ještě doplníme několik vztahů, které jsou potřebné k celému návrhu vzduchové kotoučové cívky. V rovnicích (1.6.21a, b) zatím neznáme délku vodiče (drátu) l_{Cu} . Proto dosadíme rovnice (1.6.21a, b) do rovnice (1.6.19) a získáme vztah:

$$\sqrt[3]{\frac{l_{Cu} S_{Cu}}{k_p}} = 27,806 \sqrt[5]{\frac{L S_{Cu}^2}{k_p^2}} = 27,806 \sqrt[5]{\frac{L I_{ef}^2}{k_p^2 \sigma_{Cu}^2}} \quad \text{kde:} \quad (1.6.26)$$

l_{Cu} je délka vodiče (drátu) [m],
 S_{cu} průřez vodiče (drátu) [m²],
 k_p činitel plnění vinutí [-],
 L vlastní indukčnost cívky [H],
 I_{ef} efektivní hodnota proudu procházejícího cívkou [A],
 σ_{Cu} proudová hustota [A/m²].

Rovnici (1.6.26) dosadíme do rovnice (1.6.23), čímž získáme velikost vnitřního průměru cívký:

$$d_{min} = 28,67 \sqrt[5]{\frac{L I_{ef}^2}{k_p^2 \sigma_{Cu}^2}} \quad [m] \quad \text{kde:} \quad (1.6.27)$$

d_{min} je vnitřní průměr cívký [m],

L vlastní indukčnost cívký [H],

I_{ef} efektivní hodnota proudu procházejícího cívkou [A],

k_p činitel plnění vinutí [-],

σ_{Cu} proudová hustota [A/m²].

Ostatní rozměry jsou příslušnými násobky vnitřního průměru cívký podle rovnice (1.6.25). Počet závitů určíme tak, že délku vodiče (drátu) l_{Cu} vyjádřenou z rovnice (1.6.26) dosadíme do rovnice (1.6.13). Průřez vodiče (drátu) S_{Cu} podle rovnice (1.6.11) dosadíme do (1.6.22). Takto získaný střední poloměr cívký r dosadíme rovněž do rovnice (1.6.13). Odtud po úpravě získáme hledaný počet závitů cívký

$$N = 167,2 \sqrt[5]{\frac{L^2 \sigma_{Cu} k_p}{I_{ef}}} \quad [-] \quad \text{kde:} \quad (1.6.28)$$

N je počet závitů cívký [-],

L vlastní indukčnost cívký [H],

σ_{Cu} proudová hustota [A/m²],

k_p činitel plnění vinutí [-],

I_{ef} efektivní hodnota proudu procházejícího cívkou [A].

Z rovnic (1.6.26) a (1.6.11) lze určit délku vodiče

$$l_{Cu} = 21499 \sqrt[5]{\frac{L^3 I_{ef}}{k_p \sigma_{Cu}}} \quad [m] \quad \text{kde:} \quad (1.6.29)$$

l_{Cu} je délka vodiče (drátu) [m],

L vlastní indukčnost cívký [H],

I_{ef} efektivní hodnota proudu procházejícího cívkou [A],

k_p činitel plnění vinutí [-],

σ_{Cu} proudová hustota [A/m²].

S pomocí rovnic (1.6.29) a (1.6.11) lze určit odpor vinutí

$$R_{Cu} = \rho_{Cu} \frac{l_{Cu}}{S_{Cu}} = 21499 \rho \sqrt[5]{\frac{L^3 \sigma_{Cu}^4}{k_p I_{ef}^4}} \quad [\Omega] \quad \text{kde:} \quad (1.6.30)$$

R_{Cu} je odpor vinutí cívky $[\Omega]$,

ρ_{Cu} rezistivita mědi $[\Omega\text{m}]$,

l_{Cu} délka vodiče (drátu) $[\text{m}]$,

S_{Cu} průřez vodiče (drátu) $[\text{m}^2]$,

L vlastní indukčnost cívky $[\text{H}]$,

σ_{Cu} proudová hustota $[\text{A}/\text{m}^2]$,

k_p činitel plnění vinutí $[-]$,

I_{ef} efektivní hodnota proudu procházejícího cívkou $[\text{A}]$.

Časová konstanta cívky bude

$$\tau = \frac{L}{R_{Cu}} = \frac{4,65 \cdot 10^{-5}}{\rho_{Cu}} \sqrt[5]{\frac{L^2 I_{ef}^4 k_p}{\sigma_{Cu}^4}} \quad [\text{s}] \quad \text{kde:} \quad (1.6.31)$$

τ je časová konstanta cívky $[\text{s}]$,

L vlastní indukčnost cívky $[\text{H}]$,

R_{Cu} je odpor vinutí cívky $[\Omega]$,

ρ_{Cu} rezistivita mědi $[\Omega\text{m}]$,

I_{ef} efektivní hodnota proudu procházejícího cívkou $[\text{A}]$,

k_p činitel plnění vinutí $[-]$,

σ_{Cu} proudová hustota $[\text{A}/\text{m}^2]$.

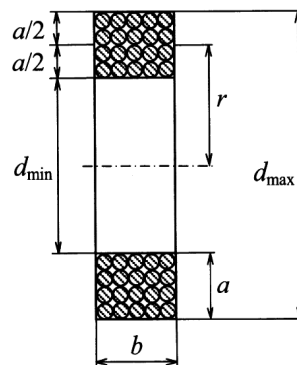
Tímto jsou uvedeny všechny potřebné vztahy pro prvotní návrh kotoučové vzduchové cívky. Vztahy jsou velmi výhodné z důvodu dosazování parametrů, které známe přímo ze zadání návrhu. V literatuře [11] je dále popsán ještě návrh cívky při zadané vlastní indukčnosti a odporu vinutí, což ale není předmětem této práce, takže další vztahy z této problematiky již uvádět nebudeme.

2 Návrh vzduchové cívky

2.1 Válcová dutina

Pro prvotní návrh vzduchové cívky s kruhovým průřezem jádra je bezesporu nejvhodnější využít výpočtů publikovaných Patočkou a popsanych v této práci v kapitole 1.6. Ze zadání plyne, že budeme postupovat dle výpočtů pro zadanou vlastní indukčnost cívky a pro zadaný trvalý proud procházející cívku. Některé hodnoty budou v návrhu upraveny s ohledem na následující výrobu funkčních vzorků tak, aby jejich výroba byla jednoduchá a cenově nenáročná. Pro větší přehlednost zde ještě jednou uvedeme obrázek 1.6.2, který svými kótami odpovídá vztahům, které budeme pro návrh používat. Dále ještě jednou uvedeme zadané parametry:

- požadovaná vlastní indukčnost $L = 6 \text{ mH}$
- trvalý harmonický proud s efektivní hodnotou $I_{ef} = 6,5 \text{ A}$



Obr. 1.6.2 K návrhu kotoučové vzduchové cívky [11]

Nejprve podle rovnice (1.6.27) vypočítáme optimální vnitřní průměr cívky d_{min} . K tomuto výpočtu ale musíme znát činitel plnění cívky k_p a proudovou hustotu σ_{Cu} . Činitel plnění se např. podle [17] pohybuje mezi 55 – 80 %. Nebo v [18] se uvádí 33 – 50 % pro ruční vinutí a zhruba 60 % pro strojní vinutí. Zvolíme tedy hodnotu $k_p = 0,6$. Proudová hustota se pohybuje také ve velkém rozmezí hodnot. Volba proudové hustoty pro vinutí totiž závisí na velkém množství faktorů. Jedná se např. o způsob chlazení cívky. V případě použití aktivního

chlazení cívky můžeme navrhnout proudovou hustotu mnohem vyšší, než v případě pasivního chlazení. Dále ji zásadně ovlivňuje způsob impregnace cívky. Cívku můžeme navinout bez jakékoliv aplikace impregnantu a potom ji dodatečně máčet (ponořit). Tento způsob je vhodný pouze pro cívky s velmi malým počtem závitů. V případě cívky s velkým počtem závitů a případně ještě malým průměrem drátu dojde k tomu, že impregnant proteče do cca prvních tří vrstev. V ostatních vrstvách je potom místo impregnantu vzduch, který vykazuje velmi malou tepelnou vodivost ($\lambda_{\text{tvzduch}} = 0,024 \text{ W/mK}$ [19]). Lepší, avšak na výrobu náročnější variantou, je vždy po navinutí jedné polohy (vrstvy) natřít celé již zhotovené vinutí dostatečným množstvím impregnantu. Nejlepším způsobem je tzv. VPI – Vacuum Pressure Impregnation. Při tomto procesu je cívka umístěna do nádoby, ze které je nejprve vyčerpán vzduch vakuovou pumpou. Tím dojde k odstranění posledních zbytků vlhkosti. Poté dojde k zalití nádoby impregnantem a následně je impregnant vystaven vysokému tlaku. Tímto způsobem se impregnant dostane i do těch nejnepřístupnějších míst. Docílíme tak zcela kompaktně impregnované cívky, která má velmi malý rozdíl teplot uvnitř (mezi závity) a na svém povrchu. Takovouto cívku je možné navrhovat na velké hodnoty proudové hustoty, protože se chladí mnohem lépe než cívky impregnované pouhým máčením. Např. podle [11] se proudová hustota v závislosti na velikosti vinutí a způsobu jeho impregnace pohybuje zhruba $\sigma_{Cu} = 1 - 5 \text{ A/mm}^2$. V jiné literatuře [20] je uváděna proudová hustota podle charakteru zatížení a umístění vinutí. Pro trvalá zatížení spodních vinutí doporučuje $\sigma_{Cu} = 2,5 \text{ A/mm}^2$, pro trvalé zatížení vrchních vinutí (vzhledem k jejich lepšímu chlazení) doporučuje $\sigma_{Cu} = 3,5 \text{ A/mm}^2$ a v případě časově omezených aplikací (např. záložní zdroje) umožňuje volit proudovou hustotu až $\sigma_{Cu} = 10 \text{ A/mm}^2$. V našem případě pro začátek zvolíme hodnotu proudové hustoty $\sigma_{Cu} = 3,5 \text{ A/mm}^2$. Zvolené hodnoty nyní dosadíme do rovnice (1.6.27).

$$d_{min} = 28,67 \sqrt[5]{\frac{L I_{ef}^2}{k_p^2 \sigma_{Cu}^2}} = 28,67 \sqrt[5]{\frac{0,006 \cdot 6,5^2}{0,6^2 (3,5 \cdot 10^6)^2}} = 64,47 \text{ mm} \quad (2.1.1)$$

Vzhledem k výrobě funkčních vzorků upravíme vnitřní průměr cívky na hodnotu $d_{min} = 63 \text{ mm}$. Jedná se totiž o standardizovaný rozměr PVC potrubí, který je velmi levný a snadno dostupný. Vnitřní průměr cívky budeme považovat za základní rozměr a již jej nebudeme nijak upravovat. Nyní můžeme podle rovnice (1.6.25) vypočítat zbylé rozměry cívky. Ne všechny budeme v dalších výpočtech potřebovat, ale mohou nám posloužit k určité kontrole průběhu výpočtu, funkce kontrolního programu nebo k přípravě kostry pro navíjení.

$$a : b : r : d_{max} : d_{min} = 0,428 : 0,475 : 0,714 : 1,855 : 1 \quad (2.1.2)$$

Z této rovnice je zřejmé, že:

$$d_{max} = d_{min} \cdot 1,855 = 63 \cdot 1,855 = 117 \text{ mm} \quad (2.1.3)$$

$$r = d_{min} \cdot 0,714 = 63 \cdot 0,714 = 45 \text{ mm} \quad (2.1.4)$$

$$b = d_{min} \cdot 0,475 = 63 \cdot 0,475 = 30 \text{ mm} \quad (2.1.5)$$

$$a = d_{min} \cdot 0,428 = 63 \cdot 0,428 = 27 \text{ mm} \quad (2.1.6)$$

Následně podle rovnice (1.6.28) vypočítáme počet závitů cívky.

$$N = 167,2 \sqrt[5]{\frac{L^2 \sigma_{Cu} k_p}{I_{ef}}} = 167,2 \sqrt[5]{\frac{0,006^2 \cdot 3,5 \cdot 0,6}{6,5}} = 273 \quad (2.1.7)$$

Dále podle rovnice (1.6.11) určíme průřez drátu S_{Cu} a průměr drátu d .

$$S_{Cu} = \frac{I_{ef}}{\sigma_{Cu}} = \frac{6,5}{3,5} = 1,86 \text{ mm}^2 \quad (2.1.8)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 S_{Cu}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,86}{\pi}} = 1,54 \text{ mm} \quad (2.1.9)$$

Z normalizované řady, ve které se lakované dráty určené k navíjení cívek vyrábí, vybereme drát o průměru 1,5 mm. Dodatečnou kontrolou oteplení zjistíme, zda si můžeme dovolit zaokrouhlení průměru drátu, nebo jestli budeme muset vybrat z řady drát s nejbližším vyšším průměrem. Tímto je vlastní návrh cívky u konce. Ještě dopočítáme doplňující parametry cívky, které usnadňují samotnou výrobu. Jedná se o počet závitů v jedné poloze (vrstvě):

$$N_v = \frac{b}{d_{iz}} = \frac{30}{1,56} = 19,23 \rightarrow 19 \quad \text{kde:} \quad (2.1.10)$$

N_v je počet závitů v jedné poloze (vrstvě) [-]

b délka cívky [mm],

d_{iz} průměr drátu včetně izolace [mm].

Počet závitů v jedné poloze se zaokrouhlí na nejbližší nižší celé číslo, aby nebyla překročena délka cívky. Dále je vhodné vypočítat ještě počet poloh (vrstev)

$$V = \frac{N}{N_v} = \frac{273}{19} = 14,3 \quad \text{kde:} \quad (2.1.11)$$

V je počet poloh vrstev [-],

N počet závitů cívky [-],

N_v počet závitů v jedné poloze (vrstvě) [-].

Tento výpočet dává informaci o tom, že cívka bude tvořena čtrnácti celými polohami a jednou, která bude navinuta pouze do zhruba třetiny délky cívky. Nyní již máme všechny parametry cívky potřebné k její výrobě. Pro zajímavost ještě vypočítáme vlastní indukčnost cívky pomocí dalších vztahů uvedených v kapitolách 1.2 až 1.5.

Pro výpočet vlastní indukčnosti cívky podle kapitoly 1.2 (Nagaoka) musíme nejprve určit Nagaokův koeficient K . Poměr průměru cívky a její délky je $d/l = 2,1$. Z grafu na obrázku 1.2.1 odečteme hodnotu Nagaokova koeficientu $K = 0,52$. Nyní už pouze dosadíme do rovnice (1.2.3):

$$L = 4 \pi n^2 \cdot S \cdot l \cdot K \cdot 10^{-7} = 4 \pi \left(\frac{273}{0,03} \right)^2 \cdot \pi \cdot \frac{0,063^2}{4} \cdot 0,03 \cdot 0,52 \cdot 10^{-7} = 5,06 \text{ mH} \quad (2.1.12)$$

Nagaokův výpočet se tedy liší o 15,6 %.

Další porovnání provedeme s výpočtem z kapitoly 1.3 (Wheeler) podle rovnice (1.3.2). V rovnici je změněno značení rozměrů tak, aby korespondovalo se značením na obrázku 1.6.2.

$$L = 31,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{r^2 \cdot N^2}{6r + 9b + 10a} = 31,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,045^2 \cdot 273^2}{6 \cdot 0,045 + 9 \cdot 0,03 + 10 \cdot 0,027} = 5,87 \text{ mH} \quad (2.1.13)$$

Wheelerův výpočet se liší o 2,2 %. Vzhledem k tomu, že z Wheelerova výpočtu vychází i Patočkův výpočet, musí být chyba způsobena pouze zaokrouhlováním.

Při použití nomogramu v kapitole 1.4 vychází vlastní indukčnost cívky $L = 7,5 \text{ mH}$. To odpovídá odchylce 25 %, což je velmi vysoká hodnota. Na druhou stranu je zjištění vlastní indukčnosti podle nomogramu velice rychlé. Hodí se tedy spíše pro orientační určování indukčnosti.

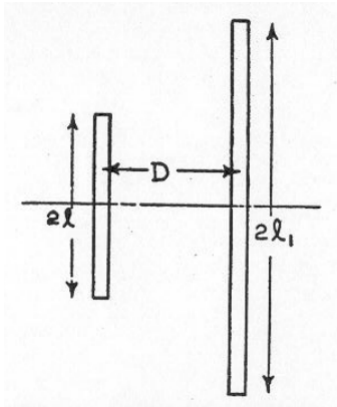
Nyní porovnáme výpočet s metodou vycházející z Mayerových výpočtů v kapitole 1.5. Po dosazení parametrů cívky do rovnic (1.5.11) až (1.5.17) dostaneme výsledek $L = 1 \text{ mH}$, což odpovídá chybě 83 %. Takto velká chyba je nejspíše způsobená velmi malým poměrem délky l a vnitřního poloměru r – viz začátek kapitoly 1.5. Autor uvádí minimum pro poměr asi 40, u navržené cívky vychází tento poměr 0,95.

V kapitole 3 provedeme kontrolu vlastní indukčnosti cívky metodou konečných prvků. Na základě tohoto modelování budeme moci určit, který výpočet ze zde uvedených je nejpřesnější.

2.2 Pravoúhlá dutina:

Vícevrstvou cívku s pravoúhlou kostrou si můžeme představit jako soubor souřadných pravoúhlých smyček. Vlastní indukčnost cívky je potom dána součtem vlastních indukčností jednotlivých smyček a jejich vzájemnou indukčností. Při bližším pohledu zjistíme, že každá smyčka je složena ze čtyř rovných částí. Vzájemná indukčnost na sebe kolmých segmentů je přitom nulová. Vzhledem k tomu, že je obdélník symetrickým útvarem, nemusíme provádět výpočet pro všechny čtyři segmenty, stačí pouze pro dva. Pokud výsledky získané takovým

výpočtem vynásobíme dvěma, získáme celkovou vlastní indukčnost cívky. Na obrázku 2.2.1 je znázorněno uspořádání dvou symetricky uložených vodičů různé délky [24].



Obr. 2.2.1 Symetricky uložené vodiče různé délky [24]

Vztah pro vlastní indukčnost dlouhého přímého vodiče délky l je převzat z literatury [23]:

$$L = 0,002 \left[l \cdot \ln \left(\frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{r} \right) - \sqrt{l^2 + r^2} + \frac{l}{4} + r \right] \quad [\mu H] \quad \text{kde:} \quad (2.2.1)$$

L je vlastní indukčnost přímého vodiče [μH],

$2l$ délka přímého vodiče [mm],

r poloměr vodiče [mm].

Vzájemnou indukčnost dvou vodičů, které jsou vůči sobě v symetrické poloze, ale nejsou stejně dlouhé, vypočítáme pomocí vztahu [24]:

$$M = 0,002 \left[2l_1 \cdot \ln \left(\frac{l_1 + l_2 + \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + D^2}}{D} \right) + (l_1 - l_2) \cdot \ln \left(\frac{l_1 + l_2 + \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + D^2}}{l_1 - l_2 + \sqrt{(l_1 - l_2)^2 + D^2}} \right) + \sqrt{(l_1 - l_2)^2 + D^2} - \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + D^2} \right] \quad (2.2.2)$$

kde:

M je vzájemná indukčnost [mH],

l_1 polovina délky delšího vodiče [mm],

l_2 polovina délky kratšího vodiče [mm],

D kolmá vzdálenost vodičů [mm].

Vzhledem ke komplexnosti tohoto problému je vhodné vlastní indukčnost vícevrstvé cívky řešit numericky.

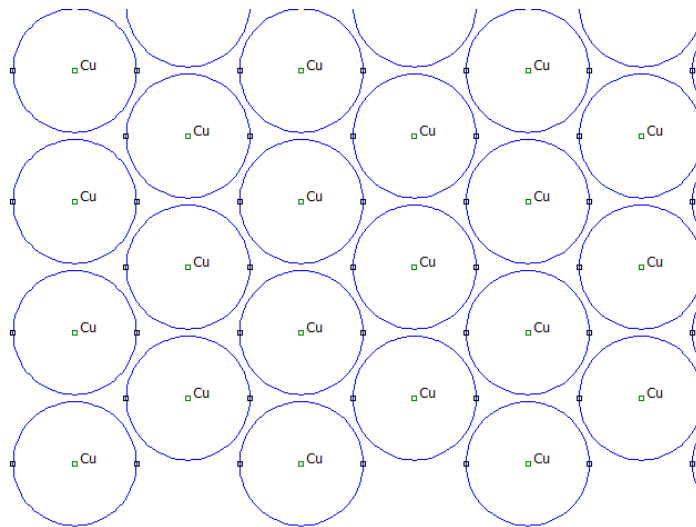
Reálná smyčka (jeden závit) drátu navinutého na pravoúhlém jádře však ve skutečnosti nepředstavuje přesný obdélník. Ve výše uvedeném výpočtu dochází k zanedbání zaoblení rohů obdélníku. Přesto lze podle [25] pomocí numerických výpočtů založených na uvedených vztazích dosáhnout přesnosti výpočtu $\pm 5\%$.

3 Kontrola vlastní indukčnosti cívky (MKP)

3.1 Válcová dutina

Metoda Konečných Prvků (MKP) [3], anglicky the Finite Element Method (FEM), je velmi silným numerickým nástrojem k řešení polí obecně. V tomto případě se samozřejmě budeme zabývat pouze magnetickým polem. (Elektrické pole by přicházelo na řadu např. v případě, že by cívka pracovala s vysokým napětím a hrozilo by poškození izolace přeskokem nebo částečnými výboji.) První numerickou metodou byla však metoda konečných diferencí (MKD), která dávala po provedení výpočtu informaci o stavových proměnných pouze v uzlech výpočetní sítě. Výpočetní síť měla pravoúhlý tvar (čtverce nebo obdélníky) pro x , y souřadnice a polární tvar (soustředná mezikruží rozdělená paprsky protínající počátek). Na určité definiční oblasti bylo potřeba vyřešit *Poissonovu rovnici*. Nedlouho poté byla vyvinuta právě metoda konečných prvků. Tato metoda se odlišuje jak tvarem elementů výpočetní sítě, tak i samotným výpočtem. Diskretizací definiční oblasti pomocí tzv. triangulace vznikne výpočetní síť. Triangulaci provádíme tak, aby dva trojúhelníky: neměly žádný společný bod (byly tzv. disjunktní); měly společnou celou jednu stranu; měly společný jeden vrchol. Při použití triangulace diskretizovaná oblast mnohem lépe kopíruje hranice původní, téměř jakkoliv křivočaré. Pro výpočet se potom využívá *variačního principu*. Výhodné na MKP oproti MKD je skutečnost, že po vypočtení potenciálů ve vrcholech trojúhelníků již velmi snadno dopočítáme potenciál v kterémkoliv bodě trojúhelníka. Avšak problémem zůstává vhodné navržení modelu a správná interpretace výsledků získaných pomocí MKP. Je dobré si při tvorbě modelu všimnout různých symetrií nebo opakování prvků, které umožní zjednodušení výpočtu. V takovém případě můžeme při využití stejného výpočetního výkonu např. zvýšit přesnost výpočtu nebo zjemnit výpočetní síť. Dále je potřeba se na základě zkušenosti rozhodnout, které detaily je možné z modelu vynechat a které nikoliv. Například při modelování výstupu vinutí z drážky motoru za účelem zjištění elektrostatických poměrů v dané oblasti hraje velký význam právě přesné vymodelování tvaru konce drážky. Je vhodné alespoň zhruba odhadnout a vymodelovat hranu plechu tak, jak se deformuje při ražení drážky. V této oblasti je právě tímto tvarem způsoben lokální extrém intenzity elektrického pole. V této práci jsou veškeré MKP modely řešeny pomocí programu FEMM 4.2.

V našem případě se budeme snažit zanést do MKP modelu cívky co nejvíce detailů, které mohou ovlivňovat vlastní indukčnost cívky. Protože ověřujeme vlastní indukčnost válcové cívky, vytvoříme model v axisymetrickém souřadnicovém systému. Model potom bude složen z jednotlivých závitů cívky, aby byly zohledněny vzduchové mezery mezi závitů a tloušťka impregnačního laku. Aby byl model co nejvíce odpovídající skutečnosti, posune se každá sudá poloha (vrstva) o polovinu průměru drátu nahoru a bude mít o jeden závit méně. To respektuje skutečnost, že při navíjení drát vždycky sklouzne do nejnižšího možného bodu mezi jiné dva závitů z předchozí polohy (vrstvy).



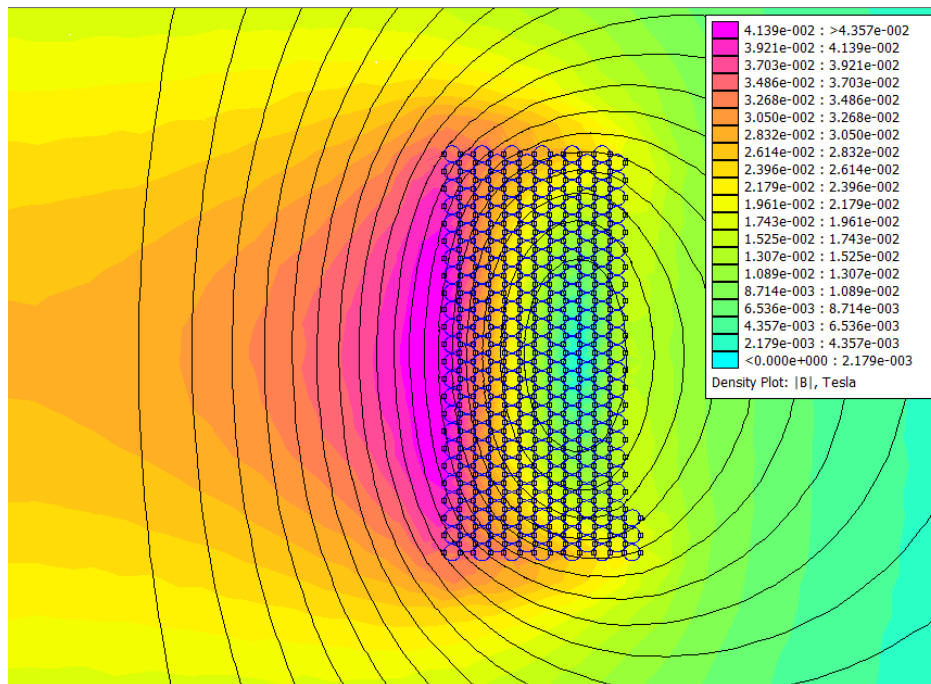
Obr. 3.1.1 Jednotlivé závitů MKP modelu

Protože je tato práce zaměřená na návrh cívky, bylo by dobré najít způsob, jak upravit některé parametry cívky, aby vykazovala zadanou vlastní indukčnost. S tím ale zároveň souvisí to, že bychom museli při jakékoliv změně (počet závitů nebo rozměry cívky) zanést tuto změnu i do MKP modelu. Proto se jako velice výhodné jeví použití skriptů jak pro tvorbu geometrie, tak i pro následné výpočty. Tyto skripty jsou napsány v programovacím jazyce LUA 4.0. Celé skripty jsou uvedeny v příloze této práce. Skripty jsou napsány tak, aby bylo možné měnit vstupní parametry na začátku textového souboru. Dále umožňují zadat pro základní parametry cívky rozmezí těchto parametrů a krok, se kterým bude program v daném rozmezí postupovat. Znamená to tedy, že je možné zadat např. počet závitů v rozmezí od vypočítaného počtu závitů -5 závitů do vypočítaného počtu závitů +5 závitů s krokem 1 závit. Program už potom automaticky vypočítá řešení MKP modelu pro $N-5$ závitů, $N-4$ závitů, atd.

až do počtu $N+5$ závitů. Tímto způsobem lze zadávat ještě délku cívky, vnitřní průměr cívky a průměr drátu. Výsledkem běhu programu je potom textový soubor (*.txt*), ve kterém jsou přehledně seřazeny výsledky jednotlivých modelů. V tomto souboru už stačí pouze vybrat model, ve kterém je vypočítaná vlastní indukčnost s požadovanou odchylkou rovna zadané vlastní indukčnosti. Dále se po skončení programu uloží obrázky rozložení magnetické indukce v okolí cívky ve formátu (*.png*), soubory s vytvořenou geometrií před spuštěním tvorby výpočetní sítě ve formátu (*.fem*) a soubory s vyřešeným MKP modelem ve formátu (*.ans*). Zadávání vstupních hodnot nebo výpisu výstupních hodnot je možné velice snadno upravit přepsáním skriptu. Skripty jsou obvyčejné textové soubory (*.txt*), u kterých se pouze po jejich vyhotovení přepíše přípona na (*.lua*).

Skript je členěn do několika částí. V první části se zakládá nový dokument, definují se základní parametry řešeného MKP modelu, přiřazuje se název, pod kterým se budou výsledky ukládat, a nově vytvořený soubor se uloží. Druhá část je určená k zadávání vstupních dat. To znamená zejména geometrických rozměrů cívky a počtu závitů včetně příslušných výše zmíněných kroků. V této části je umožněno zadávat i další hodnoty, jako jsou např. poloměr kružnice tvořící okolí, vodivost mědi, proud a různé indexy potřebné pro výpočet. V komentářích skriptu jsou všechny veličiny popsány včetně příslušných jednotek, ve kterých je třeba hodnoty zadávat. Třetí není funkčně nijak zajímavá, protože se jedná pouze o přípravu výstupního textového souboru. Ve čtvrté části je sedm *for* – *cyklů*, které souží k vytvoření geometrie cívky a umožňují ji automaticky přepisovat. V této části se nachází ještě výpočet *modulo*, který zajišťuje posun všech sudých poloh (vrstev) o polovinu průměru drátu, viz předchozí text. Za tímto výpočtem již následují příkazy pro tvorbu geometrie a přiřazení materiálu jednotlivým závitům, a dvě podmínky typu *if*, kontrolující počet již vykreslených závitů. Následuje část skriptu (čtvrtá), která vytvoří hraniční půlkružnici, na které je definovaná Dirichletova okrajová podmínka pro vektorový magnetický potenciál $A = 0$. Dále se v celé zmíněné oblasti definuje jako materiál *vzduch*. Na začátku páté části skriptu se soubor s vytvořenou a nedefinovanou geometrií uloží. Tím je hotový tzv. *preprocessing*, česky bychom mohli říci „část předběžného zpracování“, ale tento výraz se nepoužívá. Potom program vytvoří výpočetní síť, provede výpočet, načte vypočtené řešení a uloží jej. V poslední části skriptu (šesté) se vypočítají požadované hodnoty. Integrací přes plochu se vypočítá proud tekoucí cívkou a energie magnetického pole cívky. Pozor, zde je potřeba nezapomenout na energii magnetického pole uvnitř závitů. U cívek s větším

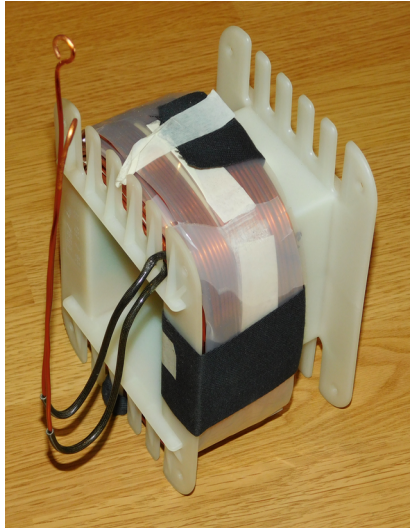
průměrem drátu může dojít ke znatelné chybě, viz kapitola 5 – Výroba funkčních vzorků. Z magnetické energie cívky a proudu, který jí protéká, snadno určíme hledanou vlastní indukčnost cívky podle rovnice (1.5.17). Všechny důležité hodnoty (zadané i vypočítané) se zapíší do textového souboru. Potom už se pouze uloží obrázek rozložení magnetické indukce a geometrie modelu se vymaže pro případ dalšího výpočtu. Tyto kroky se označují jako *postprocessing*. V případě, že již byly všechny výpočty provedeny, program se ukončí.



Obr. 3.1.2 Výsledné rozložení magnetického pole v okolí válcové cívky

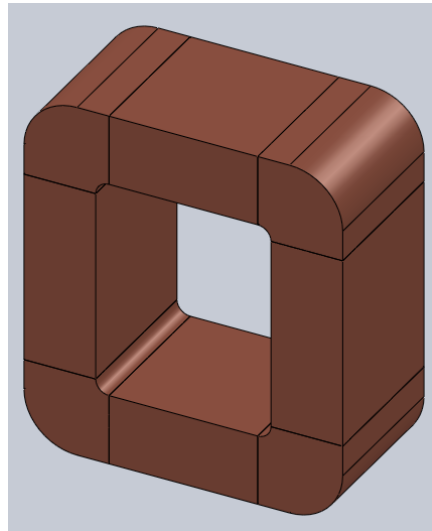
3.2 Pravoúhlá dutina

Abychom mohli hodnotit výsledky MKP modelu pro vzduchovou cívku s pravoúhlou dutinou, model je řešen pro funkční vzorek zapůjčený Katedrou elektromechaniky a výkonové elektroniky. Zapůjčený vzorek má vzduchové jádro s obdélníkovým průřezem. Cívka je zhotovena na kostře El 192/82 (rozměry jádra 82 x 66 mm). Cívka není navinuta po celé délce kostry nejspíš z důvodu dodržení předchozího výpočtu vlastní indukčnosti. Délka cívky je 58 mm. Na kostře je navinuto $N = 256$ závitů a cívka vykazuje vlastní indukčnost $L = 6,5$ mH. Cívka je na obrázku 3.2.1.



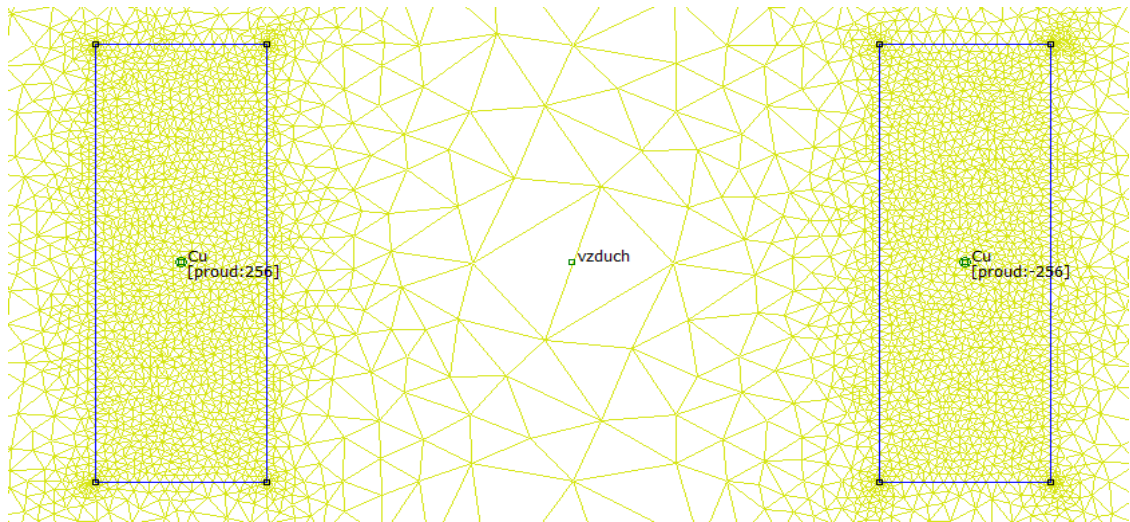
Obr 3.2.1 Cívka s pravouhloú dutinou zapůjčená KEV

V tomto případě je největším problémem, jak správně vytvořit model. Jestliže máme k dispozici program umožňující práci s trojrozměrnými tělesy, je problém vyřešen. Stačí se potom už jen rozhodnout, jak detailní model chceme tvořit. Jestli zohledníme činitel plnění vinutí (v modelu by byla cívka složena z jednotlivých závitů), nebo zvětšování poloměru ohybu drátu, nebo prohnutí rovných stran cívky za ohybem. Tyto programy ale bývají zpravidla zpoplatněny a běžný uživatel se k jejich použití jen tak nedostane. Proto je zde uveden příklad modelování zmíněné cívky pomocí programu FEMM 4.2. FEMM umožňuje při použití planárního systému zadat hloubku problému, což je další rozměr jdoucí směrem do nákresny. Nakreslíme-li tedy kruh o průměru 1 mm a zadáme hloubku problému 100 mm, můžeme si to představit jako drát (vodič) s průměrem 1 mm a délkou 100 mm, v jehož okolí si můžeme nechat programem vypočítat např. energii magnetického pole. Z této energie pak snadno získáme vlastní indukčnost dané geometrie. V případě cívky s obdélníkovým průřezem jádra je tedy potřeba nakreslit pohled na „odříznuté čelo“ a zadat příslušnou hloubku problému podle délky rovné strany cívky nachazející se za pomyslným řezem. Jinak řečeno, je potřeba modelem zohlednit všechny čtyři rovné části cívky, viz obrázek 3.2.2.



Obr. 3.2.2 Cívka s pravoúhlou dutinou s naznačenými pomyslnými řezy

Necháme program vyřešit rozložení magnetického pole v okolí tohoto uspořádání a pomocí plošných integrálů necháme vypočítat energii příslušného magnetického pole. Potom dané uspořádání otočíme o 90° a celý postup opakujeme tak, abychom získali celkovou energii (energie z obou modelů sečteme) magnetického pole generovanou naším uspořádáním. Nejsme však schopni tímto způsobem modelovat výše zmíněné detaily, jako jsou poloměry zaoblení nebo prohnutí rovných částí cívek. Zapůjčená cívka má rozměry *šířka* = 72 mm, *výška* = 86 mm a *délka* = 58 mm. Tloušťka vinutí je 20 mm. Vytvoříme tedy postupně dva modely v planárním systému. Oba modely budou tvořeny dvěma obdélníky a budou se lišit pouze vzdáleností mezi těmito obdélníky a hloubkou problému. Okolo těchto obdélníků je potřeba vytvořit ještě kružnici s poloměrem např. 500 mm. Na této kružnici definujeme Dirichletovu okrajovou podmínku pro magnetický vektorový potenciál $A = 0$. Dále zde definujeme hodnotu proudu 6,5 A. Geometrie bez okrajové kružnice (kvůli přehlednosti) je uvedena i s výpočetní sítí na obrázku 3.2.3.



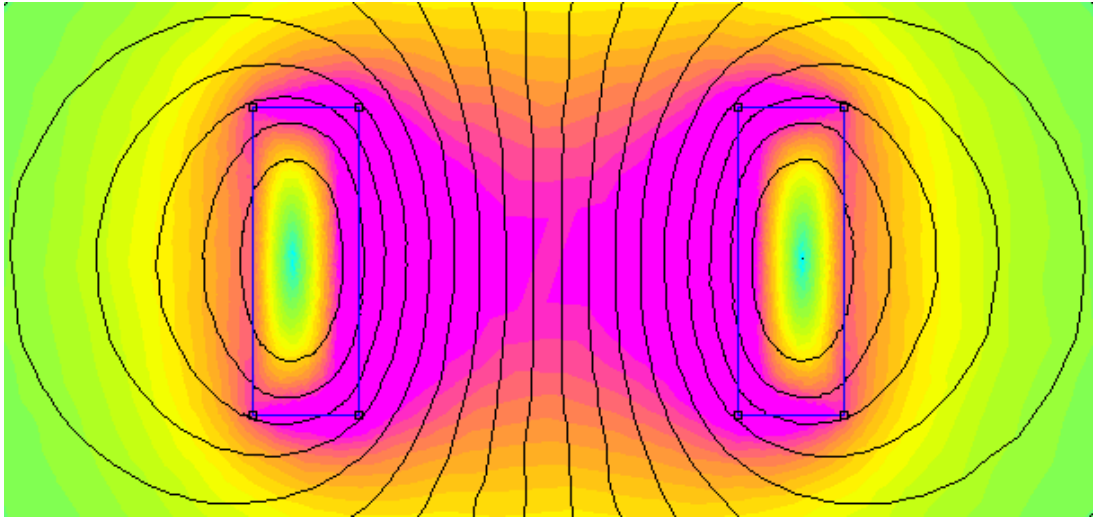
Obr. 3.2.3 Geometrické uspořádání MKP modelu pro cívku s pravoúhlou dutinou

V tomto případě jsou obdélníky od sebe vzdáleny 72 mm , jejich výška je 58 mm a hloubka problému je nastavena na 86 mm . Tento model odpovídá vertikálním rovným úsekům podle obrázku 3.2.2. Výsledné rozložení magnetického pole (konkrétně magnetické indukce \mathbf{B}) je na obrázku 3.2.4. Energie magnetického pole vypočítaná programem je $W_{m(1)} = 0,0792501\text{ J}$. Nyní vytvoříme druhý obdobný model, který bude obsahovat téměř stejnou geometrii pouze s tím rozdílem, že obdélníky budou od sebe vzdáleny 86 mm a hloubka problému bude nastavena na 69 mm . Tento model odpovídá horizontálním rovným úsekům podle obrázku 3.2.2. Energie magnetického pole v tomto případě je $W_{m(2)} = 0,0685294\text{ J}$. Součtem obou energetických příspěvků dostaneme energii magnetického pole, které je generováno celou cívku. V našem případě:

$$W_m = W_{m(1)} + W_{m(2)} = 0,0792501 + 0,0685294 = 0,1477795\text{ J} \quad (3.2.1)$$

Jestliže známe celkovou hodnotu energie magnetického pole stačí ji pouze dosadit do rovnice (1.5.17). Hodnotu proudu dosadíme podle hodnoty definované v programu (v našem případě $6,5\text{ A}$):

$$L = \frac{2 W_m}{I^2} = \frac{2 \cdot 0,1477795}{6,5^2} = 7\text{ mH} \quad (3.2.2)$$



Obr. 3.2.4 Rozložení magnetického pole (\mathbf{B}) v okolí dvou stran cívky

Oproti změřené hodnotě vlastní indukčnosti 6,5 mH se jedná o chybu asi 8 %, což je celkem únosný výsledek. Respektováním nedokonalostí vzniklých během výroby cívky (popsaných výše) by se v 3D modelu dosáhlo zcela jistě lepších výsledků.

4 Kontrola oteplení cívky (MKP)

Kontrola oteplení cívky metodou konečných prvků dává možnost lepšího určení proudové hustoty. V prvním kroku navrhne cívku s drátem určitého průměru a potom pomocí MKP modelu vyřešíme rozložení teplotního pole v cívce a jejím blízkém okolí. Abychom mohli vyzkoušet různé poměry délek stran apod., je kontrola oteplení, stejně jako kontrola vlastní indukčnosti cívky, řešena pomocí skriptu. Tento skript je velmi podobný skriptu pro kontrolní výpočet vlastní indukčnosti. Část skriptu pro tvorbu geometrie dokonce zůstala nezměněná. V úvodní části skriptu přibylo několik parametrů, které je potřeba zadat oproti magnetickému výpočtu. Jsou to tyto parametry: rezistivita mědi, teplotní součinitel elektrického odporu mědi, počáteční teplota vinutí, proměnná teplota vinutí (zadáva se očekávaná teplota – čím lépe skutečnou teplotu odhadneme, tím kratší bude doba výpočtu), měrná tepelná vodivost vzduchu, měrná tepelná vodivost laku a součinitel přestupu tepla do okolí.

Vlastní program pracuje tak, že vytvoří požadovanou geometrii stejným způsobem jako v kontrolních výpočtech vlastní indukčnosti. Potom postupně vypočítá z materiálových parametrů a z geometrických rozměrů střední délku závitu, průřez drátu, odpor jednoho závitu při počáteční teplotě, odpor jednoho závitu při aktuální teplotě a odpor celého vinutí cívky. Potom ze zadaného proudu a celkového odporu vinutí vypočítá ztrátový výkon (Jouleovy ztráty v mědi), který musí cívka svým povrchem vyzářit do okolí, aby se uchládila. Tento ztrátový výkon je přepočítán na objem mědi – touto hodnotou se v programu definují ztráty.

Dále je vypočítán chladicí povrch cívky. Následuje tvorba geometrie, na které budou definovány okrajové podmínky. V našem případě zvolíme Dirichletovu okrajovou podmínku pro teplotu, tedy v určité vzdálenosti od hrany cívky budeme definovat fixní hodnotu teploty, např. 20 °C. Problematickou úlohou je určení vzdálenosti, ve které budeme tuto podmínku definovat. Malá změna této vzdálenosti značně mění výsledky modelu. Ve skriptech [19] je tato vzdálenost popsána jako tzv. mezní vrstva, ve které přirozeně cirkuluje chladicí médium. Pro výpočet tloušťky mezní vrstvy je uveden vztah [19]:

$$l_{mz} = \frac{\lambda_{th}}{\alpha_{th}} \quad [m] \quad \text{kde:} \quad (4.1.1)$$

l_{mz} je tloušťka mezní vrstvy [m],

λ_{th} tepelná vodivost chladicího média [W/mK],

α_{th} součinitel přestupu tepla do chladicího média [W/m² K].

Problém je ale v tom, že zpravidla nikdy neznáme hodnotu součinitele přestupu tepla do okolí, protože jeho hodnota závisí i na barvě povrchu, jeho lesklosti, hrubosti a rozdílu teplot. Z tohoto důvodu jsou v další kapitole u jednotlivých vzorků vypočítány hodnoty příslušných součinitelů přestupu tepla. V literatuře se také někdy objevují empirické vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla. Například v [19] je uveden vztah pro vzduch pro rozsah teplot 20 – 120 °C:

$$\alpha_{vzduch} = 5 + 0,04 \Delta T \quad [W/m^2 K] \quad \text{kde:} \quad (4.1.2)$$

α_{vzduch} je součinitel přestupu tepla do okolí [W/m²K],

ΔT rozdíl teplot ochlazovaného povrchu a okolního vzduchu [K].

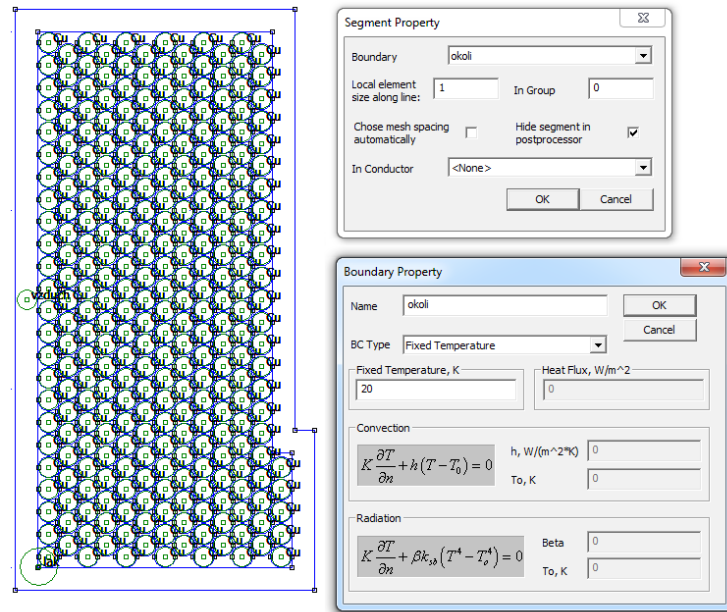
V klidném vzduchu se podle [22] teplo z povrchu tělesa odvádí sáláním, vedením a prouděním, které vzniká zředěním vzduchu při oteplení. Pro obvykle drsné povrchy je měrná chladivost:

$$\alpha = 11,3 + 0,08 \Delta T \quad [W/m^2 K] \quad \text{kde:} \quad (4.1.3)$$

α je součinitel přestupu tepla do okolí [W/m²K],

ΔT rozdíl teplot ochlazovaného povrchu a okolního vzduchu [K].

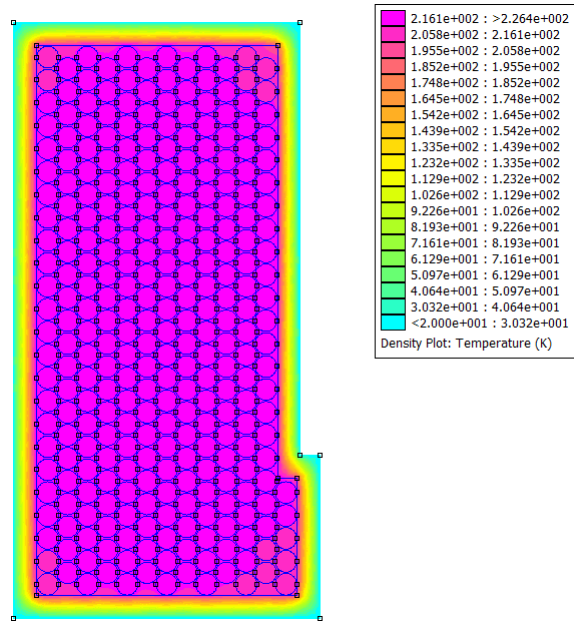
Jestliže tedy známe tloušťku mezní vrstvy l_{mz} , můžeme vytvořit vhodnou geometrii, na které budeme definovat okrajovou podmínku s fixní teplotou podle potřeby. V našem případě bylo zvoleno $T_{okoli} = 20$ °C. Vytvořená geometrie a přiřazování podmínek na rozhraní je uvedeno na obr. 4.1.1.



Obr. 4.1.1 Geometrie MKP modelu a přiřazování podmínek na rozhraní (T_{fixni})

Obr. 4.1.1 Geometrie a přiřazování podmínek na rozhraní

Při tvorbě okolí bylo nejsložitější částí skriptu obecně určit polohy rohových bodů tak, aby se geometrie okolí měnila společně s počtem závitů a tloušťka mezní vrstvy stále odpovídala zadanému součiniteli přestupu tepla do okolí. V následující části skriptu se jednotlivým oblastem přiřazují materiály a materiálové vlastnosti. Tímto je *preprocessing* u konce. Následuje uložení vytvořeného modelu, vytvoření výpočetní sítě a vlastní výpočet. Po skončení výpočtu program načte řešení a uloží jej. Dále program vypíše hodnotu teploty ve středu vinutí cívky a uloží ji do proměnné `theta`. Je provedeno vhodné přiblížení a uložení obrázku s výsledným rozložením teplotního pole (*.png*). Následuje výpis všech důležitých hodnot do textového souboru (*.txt*) a případné vymazání předchozí geometrie. V případě, že rozdíl teploty uložené v proměnné `theta` ve dvou po sobě jdoucích krocích byl větší než 0,001, výpočet pokračuje další iterací. V ní dojde k přepočtu odporu vinutí, ztrátového výkonu a novému výpočtu teploty. Výsledné rozložení teplotního pole je uvedeno na obrázku 4.1.2.



Obr. 4.1.2 Výsledné rozložení teplotního pole

Následuje příklad zadaných a vypočítaných parametrů pro vzorek č. 4. Rozdíl vypočítané a změřené teploty uvnitř cívky je asi 20 °C. Tento rozdíl je způsoben nepřesným zadáním součinitele přestupu tepla do okolí.

N [z]=	287
d-2dif [mm]=	1.18
l [mm]=	30
2R1 [mm]=	63
2R2 [mm]=	91.48
dif [mm]=	0.035
I [A]=	6.5
alfa [W/K.m ²]=	19.2
Nv [z]=	24
V [-]=	13
v [-]=	6
l_str [m]=	0.24265666165632757
Sv [m ²]=	1.093588402714608e-006
Sp [m ²]=	0.02147025743351864
rhocu [uohm.m]=	1.6900000000000001e-008
alfacu [1/K]=	0.004
lambda_Cu [W/K.m]=	401
lambda_lak [W/K.m]=	0.3
lambda_vzduch [W/K.m]=	0.024
alfa [W/K.m ²]=	19.2
lm [mm]=	1.25
theta_0 [°C]=	20
theta [°C]=	226.3037570712757
Rvtheta_0 [ohm]=	0.003749945417983339
Rvtheta [ohm]=	0.006844447385125894
Rc [ohm]=	1.964356399531132
Pc [W]=	82.99405788019031
Vcu [m ³]=	7.616017451236677e-005
Pm3 [W/m ³]=	1089730.405839785

5 Popis funkčních vzorků cívky

Pro ověření vypočítaných hodnot (analytickým nebo numerickým způsobem) bylo vyrobeno 5 vzorků cívek, které se od sebe liší různými návrhy a různými pracovními postupy během výroby, především potom způsobem impregnace. Nyní zde budou jednotlivé vzorky popsány a uvedeny hodnoty z měření jejich základních parametrů. Hodnoty naměřené při tzv. oteplovací zkoušce byly použity jako výchozí hodnoty do některých MKP modelů pro výpočet oteplení cívky.

5.1 Vzorek č. 1

První vzorek byl vyroben pouze pro orientační kontrolu první verze LUA skriptu pro program FEMM 4.2. Proto z cenových důvodů není dimenzován na požadovanou hodnotu proudu $I_{ef} = 6,5 A$. Je ale vyroben se stejným vnitřním průměrem a stejnou délkou jako ostatní vzorky. Kostra cívky je vyrobena z nosného válce (PVC trubka o průměru 63 mm) a dvou čel ve tvaru mezikruží. Ta jsou vykroužena z pertinaxové desky tloušťky 3,2 mm a dodatečně obrobena soustružením. Čela kostry jsou k nosnému válci přilepena. Pro lepší fixaci vývodů vinutí jsou v jednom z čel vyvrtané dva otvory, kterými jsou vývody prostrčeny. Aby nebyly vývody lehce zranitelné, jsou chráněny návlečnými bužírkami. Počet závitů cívky je $N = 301$ závitů lakovaným měděným drátem o průměru 0,5 mm. Vinutí bylo po navinutí jednotlivých poloh (vrstev) natíráno nitrocelulózovým lakem kvůli lepšímu přenosu tepla k povrchu cívky a hlavně potom kvůli mechanické pevnosti a kompaktnosti celého vinutí. Vzhledem k použitým materiálům (PVC trubka) je první vzorek zařazen do teplotní třídy Y (90 °C). Hodnoty teplot odpovídající jednotlivým třídám jsou převzaty z [21]. Vzorek č.1 je vidět na obrázku 5.1.1. Vlastní indukčnost cívky byla změřena RLC – metrem DT – 9935 a má hodnotu $L = 6,27 mH$. Tato hodnota odpovídá chybě $\delta = 4,5 \%$. Jak se později ukázalo, je tato odchylka způsobena chybou v první verzi skriptu k programu FEMM 4.2, o které je zmínka v kapitole 3.1. Aby byl výpočet správný, musí se integrovat energie magnetického pole z celého uvažovaného objemu a nikoliv pouze ze vzduchu (bez započítání mg. energie přímo ve vinutí cívky). Po opravě skriptu byla vlastní indukčnost cívky znovu přepočítána a výsledek se lišil až ve druhém desetinném místě, což odpovídá chybě v řádu desetin procent.

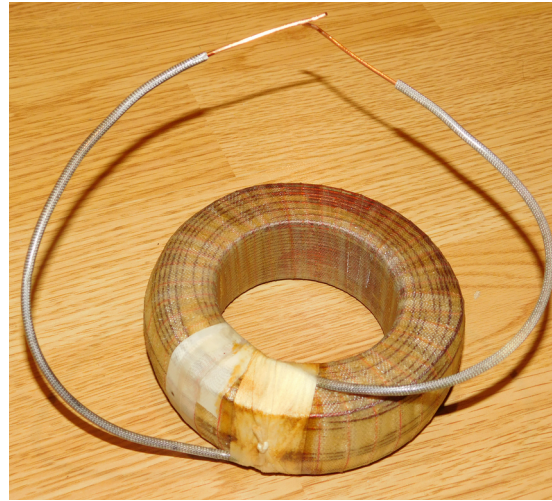


Obr. 5.1.1 Funkční vzorek č. 1

5.2 Vzorek č. 2

Vzorek č. 2 byl vyráběn s ohledem na předchozí výpočet a dostupný průměr drátu $1,5\text{ mm}$. Z technologických důvodů byl zachován i vnitřní průměr. Podle kontrolního výpočtu je navinut počet závitů $N = 304$. Z hlediska oteplení cívky je nejlepším řešením vyrobít cívku jako samonosnou, tzn. bez kostry. Cívka se potom mnohem lépe chladí. S ohledem na proudovou zatížitelnost, jak bylo uvedeno v kap. 2.1, je nejlepší cívku impregnovat vakuotlakově. Vzorek č. 2 měl tedy hlavně ukázat, zda je možné samonosnou cívku impregnovat technologií VPI, aniž by došlo k její deformaci. Vzorek je na obrázku 5.2.1. Cívka je navinuta na rozebiratelnou kostru složenou z PVC trubky a dvou čel vysoustružených z pertinaxu. Cívka byla navinuta pomocí běžného soustruhu. Otáčení vřetenem a ukládání jednotlivých závitů bylo řešeno ručně. Navíjení tedy není strojní, a kvalita vinutí tomu odpovídá. Jak se ale později ukázalo, pro účely ověření výpočtů indukčností je i tato kvalita vinutí postačující. Po zhotovení vinutí byla cívka provizorně stažena běžným tkalounem šířky 20 mm , který se musí hned na začátku navíjení vložit pod první polohu (vrstvu). Celkem problematickou se ukázala demontáž navíjecího trnu (PVC trubky) z dutiny cívky. Trubka se musela rovnoměrně a velkou silou vyrážet, přičemž hrozilo poškození izolačního laku drátu nebo přetržení některého z provizorních tkalounů, což by mělo za následek nevratnou deformaci vinutí a použitá měď by byla znehodnocena. Bandážování celé cívky bylo provedeno v profesionální cívkárně (Škoda electric TRM) skelnou páskou. Potom byla cívka impregnována technologií VPI. Jako impregnant byl použit jednosložkový epoxidový lak – Epoxylite 3750LV od firmy Elantas. Tento lak je vyroben pro

teplotní třídu H (180°C), ale použitý drát má izolaci vyrobenou z materiálu v teplotní třídě F (155°C). Maximální teplota uvnitř cívky by tedy neměla překročit 155°C .

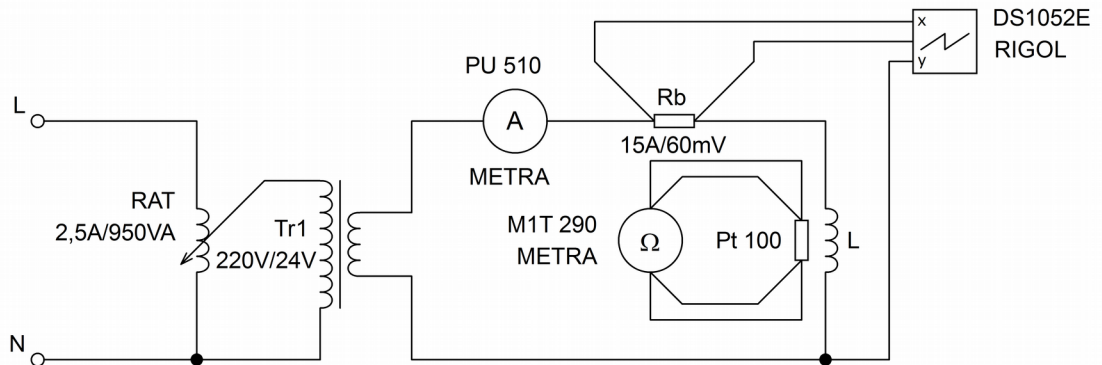


Obr. 5.2.1 Funkční vzorek č. 2

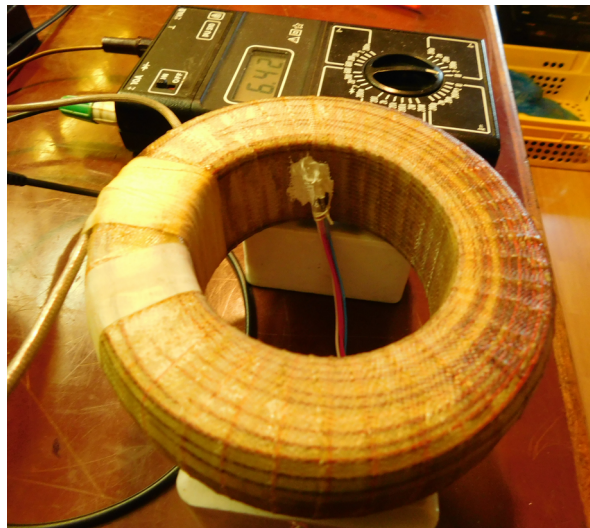
Hodnoty změřené na vyrobeném funkčním vzorku č. 2:

U všech vyráběných vzorků byly postupně měřeny vlastní indukčnost cívky, její ohmický odpor (za studena i za tepla), parazitní kapacita, a dále byla provedena oteplovací zkouška. Schéma zapojení pro měření oteplovací zkoušky je uvedeno na obrázku 5.2.2. Funkční vzorek byl napájen přes regulovatelný autotransformátor a oddělovací snižovací transformátor napětí $220/24\text{V}$. Oddělovací transformátor sloužil ke galvanickému oddělení z důvodu bezpečnosti při měření a ke zvýšení citlivosti regulace regulačním autotransformátorem. Z oddělovacího transformátoru byla cívka napájena přes ampérmetr a bočník. Ampérmetrem byla měřena efektivní hodnota proudu protékajícího cívkou. Na bočníku $15\text{A}/60\text{mV}$ bylo osciloskopem měřeno napětí, které tvarem i fázovým posunem odpovídá proudu. Druhým kanálem osciloskopu bylo měřeno napětí na měřené cívce. Z osciloskopu byly odečítány hodnoty napětí na cívce a fázového posunu mezi napětím a proudem. Z efektivních hodnot napětí a proudu a fázového posunu byl určen ztrátový činný výkon cívky. Uložení cívky a umístění Pt článku pro měření povrchové teploty cívky je patrné z obrázku 5.2.3. Hlavním cílem měření bylo zjistit, na jaké hodnotě se teplota cívky ustálí při předepsaném proudu $I_{ef} = 6,5\text{ A}$, resp. zda nebude při tomto proudu překročena maximální teplota dané teplotní třídy. Dalším důležitým měřením bylo pomocí RLC – metru zjistit

skutečnou hodnotu vlastní indukčnosti cívky, aby mohla být porovnána s výpočtem a s ověřovacím modelem v programu FEMM. Dále byla vypočítána hodnota součinitele přestupu tepla do okolí, která odpovídá konkrétnímu povrchu cívky. Známe-li tuto hodnotu, můžeme ji dosadit do vzorce pro výpočet tloušťky mezní vrstvy v modelu oteplení. Model se tím značně zpřesní.



Obr. 5.2.2 Schéma zapojení přístrojů při měření oteplovací zkoušky



Obr. 5.2.3 Poloha cívky při měření a umístění Pt článku pro měření povrchové teploty

Během měření byla efektivní hodnota proudu udržována pomocí regulačního autotransformátoru na $6,5 A \pm 10 \%$. Nižší rozptyl hodnot proudu nebylo možné dodržovat z důvodu velkých výkyvů napětí distribuční sítě v místě měření. Teplota byla považována za ustálenou v případě, že se její hodnota během jedné hodiny nezměnila o více než jeden stupeň

Celsia (v absolutní hodnotě). Parametry cívky jsou uvedeny v tabulce 5.2.1. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.2.2 a použité přístroje jsou zapsány v tabulce 5.2.3. Hmotnost vzorku č. 2 je 1,33 kg.

Tab. 5.2.1 Parametry funkčního vzorku č. 2

L [mH]	δ_L [%]	R_{20} [Ω]	R_{110} [Ω]	C_{par} [μ F]	\varnothing CuL; (tepl. třída)	lak (typ; tepl. třída)	N [-]	d_i [mm]	d_o [mm]	l_{skut} [mm]
6,96	16	0,8	1	3,64	1,5; F	EpoxyLite 3750LV; H	303	63	112	34

Tab. 5.2.2 Změřené a vypočítané hodnoty

Čas [hh:mm]	U_{ef} [V]	φ [°]	ΔP [W]	R_{pt} [Ω]	T_{pt} [°C]
00:00	13,5	70	30	107,6	19,7
00:30	14	65	38,5	130,2	78,4
01:00	14,2	63	41,9	138,2	99,2
01:15	14,3	62	43,6	139,9	103,6
01:30	14,3	62	43,6	141,0	106,5
01:45	14,4	61	45,4	141,6	108,1
02:00	14,4	61	45,4	142,0	109,1
02:15	14,4	61	45,4	142,4	110,1
02:30	14,4	61	45,4	142,6	110,7
02:45	14,4	61	45,4	142,3	110,0

Příklady výpočtu:

Ztrátový výkon cívky:

$$\Delta P = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\varphi) = 13,5 \cdot 6,5 \cdot \cos(70) = 30 \text{ W}$$

Teplota povrchu cívky:

$$T_{pt} = \frac{R_{pt} - 100}{0,385} = \frac{107,6 - 100}{0,385} = 19,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla do okolí:

$$\alpha_{Th} = \frac{\Delta P}{S_p \cdot \Delta T} = \frac{45,4}{28,875 \cdot 10^{-3} \cdot (110 - 20)} = 17,5 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ kde:}$$

S_p je povrch [m^2], kterým se cívka ochlazuje, a vypočítá se:

$$S_p = l_{stř} \cdot o = 0,275 \cdot 0,105 = 28,875 \cdot 10^{-3} m^2 \quad \text{kde:}$$

$l_{stř}$ je délka středního závitu [m],

o obvod průřezu cívky změřený pomocí provázku [m].

Tab. 5.2.3 Použité měřicí přístroje a zařízení

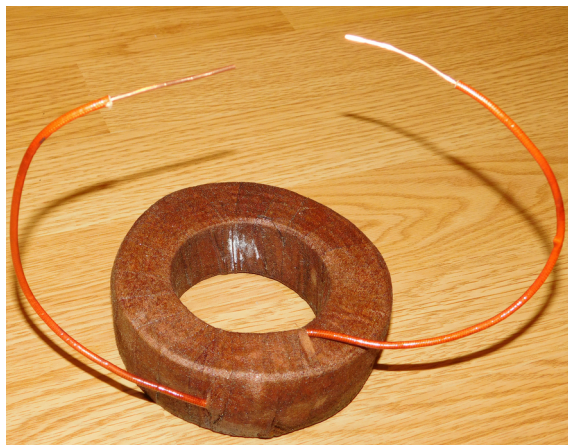
regulovatelný autotransformátor	RT2,5 – 2,5A – 950VA – No 7689 – Křižík
oddělovací transformátor	220/24V – 500VA – ZSE Praha – IBC-05
ampérmetr	PU 510 – Metra Blansko
osciloskop	RIGOL DS1052E
ohmmetr (Pt – článek)	MIT 290 – Metra Blansko (čtyřvodičové připojení)
bočník	15A/60mV – 58P – No 996851

Odchylka od požadované vlastní indukčnosti 16 % je zcela únosnou hodnotou, uvážíme-li, že běžně prodávané cívky mívají toleranci 20 %. Jak již ale bylo zmíněno dříve, byly některé kontrolní výpočty provedeny podle chybně napsaných skriptů, což je případ i tohoto vzorku. Po opravě skriptu vyšla vlastní indukčnost cívky podle kontrolního výpočtu $L = 6,972 mH$, což odpovídá chybě $\delta = 0,2 \%$. To je možné považovat za skvělý výsledek. Jestliže předpokládáme teplotu uvnitř cívky o cca 15 – 20 °C vyšší, než je povrchová teplota, je zřejmé, že se cívka bez problémů uchladí a dokonce zbyde ještě teplotní rezerva. Je ale nutné zdůraznit, že teplota okolí byla $T_{okoli} = 20 \text{ °C}$. Běžně se uvažuje teplota okolí i $T_{okoli} = 40 \text{ °C}$ a v takovém případě by se teplota uvnitř cívky blížila maximální teplotě dané teplotní třídy, v tomto případě F (155 °C).

5.3 Vzorek č. 3

Vzorek č. 3 byl vyroben podle stejného kontrolního výpočtu jako předchozí vzorek. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma vzorky je způsob jejich impregnace. Zatímco předchozí vzorek byl navíjen „na sucho“ a později impregnován VPI technologií v teplotní třídě H (180 °C), byl vzorek č. 3 kompletně proveden ve třídě F (155 °C). Protože zde nebylo možné použít VPI technologii (v profesionální cívkárně používají pouze impregnanty třídy H a 200), musela být cívka impregnována postupně, tzn. po navinutí každé jedné polohy (vrstvy) byla

natřena impregnačním lakem. Bylo použito syntetického impregnačního laku S1903 ředěného běžným ředidlem S6003. Navíjení probíhalo stejným způsobem jako u předchozího vzorku. Po rezebrání a demontáži provizorní kostry cívky byly vývody opatřeny ochrannými bužirkami a bylo provedeno bandážování celé cívky běžným tkalounem. Potom byla celá cívka důkladně natřena a napuštěna impregnačním lakem i zvenku. Lak použitý pro impregnaci cívky byl vytvrzován při teplotě 150 °C po dobu cca 6 hodin. Vzorek č. 3 je na obrázku 5.3.1.



Obr. 5.3.1 Funkční vzorek č. 3

Hodnoty změřené na vyrobeném vzorku č. 3

Měření třetího vyrobeného vzorku probíhalo zcela obdobně jako u předchozího. Schéma zapojení je stejné – viz obrázek 5.2.2. Postup měření a měřené veličiny byly také shodné. Hmotnost vzorku č. 3 je 1,3 kg.

Tab. 5.3.1 Parametry funkčního vzorku č. 3

L [mH]	δ_L [%]	R_{20} [Ω]	R_{130} [Ω]	C_{par} [μ F]	\varnothing CuL; (tepl. třída)	lak (typ; tepl. třída)	N [-]	d_i [mm]	d_o [mm]	l_{skut} [mm]
6,84	14	0,79	0,94	3,7	1,5; F	S1903; F	303	63	110	34

Tab. 5.3.2 Změřené a vypočítané hodnoty

Čas [hh:mm]	U_{ef} [V]	φ [°]	ΔP [W]	R_{Pt} [Ω]	T_{Pt} [°C]
00:00	15,8	63	46,6	139	101,3
00:30	16,1	62	49,1	146,7	121,3
00:45	16,1	62	49,1	148,7	126,5
01:00	16,1	61	50,7	149,8	129,4
01:15	16,1	61	50,7	150,7	131,7
01:30	16,1	61	50,7	151,6	134,0
01:45	16,1	61	50,7	151,4	133,5
02:00	16,1	61	50,7	151,5	133,8
02:15	16,2	61	51	151,6	134,0
02:30	16,2	61	51	151,9	134,8
02:45	16,2	61	51	151,6	134,0

Příklady výpočtu:

Ztrátový výkon cívky:

$$\Delta P = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\varphi) = 15,8 \cdot 6,5 \cdot \cos(63) = 46,6 \text{ W}$$

Teplota povrchu cívky:

$$T_{Pt} = \frac{R_{Pt} - 100}{0,385} = \frac{139 - 100}{0,385} = 101,3 \text{ °C}$$

Součinitel přestupu tepla do okolí:

$$\alpha_{Th} = \frac{\Delta P}{S_p \cdot \Delta T} = \frac{51}{29,92 \cdot 10^{-3} \cdot (134 - 20)} = 15 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad \text{kde:}$$

S_p je povrch [m²] kterým se cívka ochlazuje a vypočítá se:

$$S_p = l_{stř} \cdot o = 0,272 \cdot 0,11 = 29,92 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad \text{kde:}$$

$l_{stř}$ je délka středního závitu [m],

o obvod průřezu cívky změřený pomocí provázku [m].

Tab. 5.3.3 Použité měřicí přístroje a zařízení

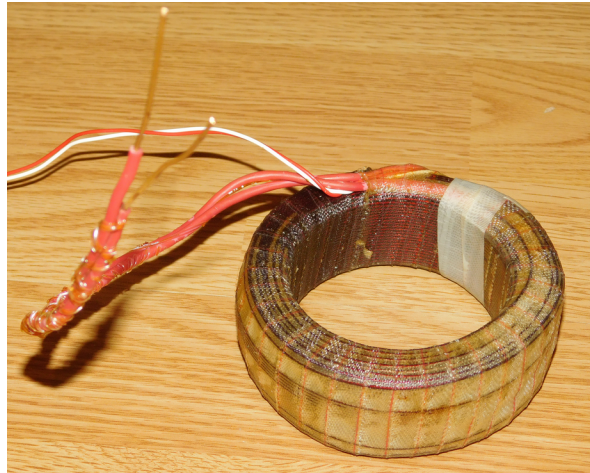
regulovatelný autotransformátor	RT2,5 – 2,5A – 950VA – No 7689 – Křížík
oddělovací transformátor	220/24V – 500VA – ZSE Praha – IBC-05
ampérmetr	PU 510 – Metra Blansko
osciloskop	RIGOL DS1052E
ohmmetr (Pt – článek)	M1T 290 – Metra Blansko (čtyřvodičové připojení)
bočník	15A/60mV – 58P – No 996851

Co se vlastní indukčnosti týče, nastal u tohoto vzorku stejný problém se skriptem pro kontrolní výpočet jako u vzorku č. 2. Protože jsme již ověřili funkčnost skriptu u předchozího vzorku a vlastní indukčnosti i geometrické rozměry cívek jsou téměř stejné, nebyl již kontrolní výpočet pro třetí vzorek přepočítáván. Pokud budeme předpokládat navýšení teploty uvnitř cívky opět o cca 15 – 20 °C, dostáváme se k hodnotám okolo 150 °C. To znamená, že se blížíme maximální teplotě zvolené teplotní třídy, a pokud bychom uvažovali okolní teplotu vyšší než $T_{okoli} = 20$ °C, byla by již maximální teplota dané teplotní třídy F (155°C) překročena a izolační systém cívky by byl ohrožen.

5.4 Vzorek č. 4

Vzorek č. 4 byl konstruován s maximálním ohledem na minimalizaci rozměrů a hmotnosti cívky. Byla tedy zvolena velmi vysoká proudová hustota ve vinutí $J = 5,94$ A/mm², což odpovídá průměru drátu $d = 1,18$ mm. Průměr drátu byl vybrán i s ohledem na dostupnost drátu v teplotní třídě H (180 °C). Se změnou průměru drátu bylo potřeba změnit i kontrolní výpočet vlastní indukčnosti (jedná se o již opravený skript pro kontrolní výpočet). Vnitřní průměr byl však zachován, aby bylo možné použít přípravky pro navíjení (hlavně se jednalo o navíjecí trn a provizorní čela kostry cívky). Technologický postup při výrobě vzorku zůstal stejný jako u předchozích vzorků. Stejně jako u vzorku č. 2 byla cívka bandážována v profesionální cívkárně (Škoda electric TRM) skelnou páskou a poté impregnována epoxidovým lakem Epoxylite 3750LV VPI technologií. Během bandážování cívky došlo k jejímu nepatrnému zborcení, což ale nemělo vliv na zkoumané parametry. Výjimkou tohoto vzorku je Pt – článek umístěný přímo do jeho vinutí, a sice mezi šestou a sedmou polohu (vrstvou). Tento Pt – článek umožní změřit přímo uvnitř vinutí teplotu, která

byla dosud pouze odhadována na základě teoretických předpokladů a dosavadních zkušeností. Vzorek č. 4 je na obrázku 5.4.1.



Obr. 5.4.1 Funkční vzorek č. 4

Hodnoty změřené na vyrobeném vzorku č. 4

Měření čtvrtého vyrobeného vzorku probíhalo zcela obdobně jako u předchozího s rozšířením o jeden multimetr, kterým byl měřen odpor Pt – článku umístěného ve vinutí cívky. Schéma zapojení je stejné – viz obrázek 5.2.2. Postup měření a měřené veličiny byly také shodné. Hmotnost vzorku č. 4 je 0,7 kg.

Tab. 5.4.1 Parametry funkčního vzorku č. 4

L [mH]	δ_L [%]	R_{20} [Ω]	R_{200} [Ω]	C_{par} [μ F]	\varnothing CuL; (tepl. třída)	lak (typ; tepl. třída)	N [-]	d_i [mm]	d_o [mm]	l_{skut} [mm]
5,93	1,2	1,12	1,87	4,27	1,18; H	EpoxyLite 3750LV; H	287	63	91,5	32,5

Tab. 5.4.2 Změřené a vypočítané hodnoty

Čas [hh:mm]	U_{ef} [V]	φ [°]	ΔP [W]	R_{Ptint} [Ω]	T_{Ptint} [°C]	R_{Pttext} [Ω]	T_{Pttext} [°C]
00:00	13,2	59	44,2	109,3	24,2	109,3	24,2
00:15	14,2	48	61,8	157,0	148,1	147,4	123,1
00:30	14,3	46	64,6	175,0	194,8	163,5	165,0
00:45	14,3	45	65,7	180,0	207,8	168,0	176,6
01:00	14,4	45	66,2	180,0	207,8	168,2	177,1
01:15	14,4	45	66,2	178,0	202,6	169,0	179,2
01:30	14,4	45	66,2	178,1	202,9	169,5	180,5
01:45	14,4	45	66,2	178,5	203,9	170,2	182,3
02:00	14,4	45	66,2	178,2	203,1	169,4	180,3
02:15	14,4	45	66,2	178,3	203,4	169,6	180,8
02:30	14,4	45	66,2	178,1	202,9	169,6	180,8

Příklady výpočtu:

Ztrátový výkon cívky:

$$\Delta P = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\varphi) = 13,2 \cdot 6,5 \cdot \cos(59) = 44,2 \text{ W}$$

Teplota povrchu cívky:

$$T_{Pt} = \frac{R_{Pt} - 100}{0,385} = \frac{109,3 - 100}{0,385} = 24,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla do okolí:

$$\alpha_{Th} = \frac{\Delta P}{S_p \cdot \Delta T} = \frac{66,2}{21,48 \cdot 10^{-3} \cdot (180,8 - 20)} = 19,2 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ kde:}$$

S_p je povrch [m^2], kterým se cívka ochlazuje, a vypočítá se:

$$S_p = l_{stř} \cdot o = 0,243 \cdot 0,0885 = 21,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kde:}$$

$l_{stř}$ je délka středního závitu [m],

o obvod průřezu cívky změřený pomocí provázku [m].

Tab. 5.4.3 Použité měřicí přístroje a zařízení

regulovatelný autotransformátor	RT2,5 – 2,5A – 950VA – No 7689 – Křižík
oddělovací transformátor	220/24V – 500VA – ZSE Praha – IBC-05
ampérmetr	PU 510 – Metra Blansko
osciloskop	RIGOL DS1052E
ohmmetr (Pt – článek)	MIT 290 – Metra Blansko (čtyřvodičové připojení)
bočník	15A/60mV – 58P – No 996851
multimetr (Pt – článek)	DT9205A

Rozdíl mezi vlastní indukčností měřeného vzorku č. 4 a předchozím kontrolním výpočtem činil $0,07 \text{ mH}$, což odpovídá chybě $\delta = 1,2 \%$. Takto malou chybu lze považovat za velký úspěch při návrhu cívky. Důsledkem zvolení vysoké proudové hustoty teplota uvnitř cívky přesáhla maximální povolenou teplotu dané teplotní třídy H ($180 \text{ }^\circ\text{C}$) o necelých $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Cívka by tedy nemohla s předepsaným proudem pracovat trvale nebo dokonce při zvýšené teplotě okolí na běžně uvažovanou hodnotu $T_{\text{okolí}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota uvnitř cívky byla překročena vzhledem k maximální povolené teplotě asi o 13% . Na tomto vzorku se potvrdila celkem správná úvaha, že teplota uvnitř cívky je asi o $20 \text{ }^\circ\text{C}$ vyšší než povrchová teplota cívky. Tato skutečnost podkládá závěry z měření předešlých vzorků.

5.5 Vzorek č. 5

U tohoto vzorku byl také hlavní důraz kladen na minimalizaci. Vzhledem k požadavku vyrobit tento vzorek v teplotní třídě F ($155 \text{ }^\circ\text{C}$) byla zvolena nižší proudová hustota ve vinutí než v předchozím případě $J = 4,75 \text{ A/mm}^2$. Průměr drátu byl zvolen $d = 1,32 \text{ mm}$. Opět tedy bylo potřeba změnit parametry kontrolního výpočtu a nechat jej programem přepočítat. Vinutí bylo zhotoveno stejným postupem jako u předchozích vzorků. Bandážováno bylo běžným tkalounem a impregnováno bylo syntetickým lakem *SI903*. Před výrobou pátého vzorku došlo k nepatrné úpravě navíjecího trnu, která spočívala v rozříznutí PVC trubky v podélném směru. Při rozebírání provizorní kostry cívky tak bylo možné nejprve velkou silou odstranit střední dřevěný špalík a rozříznutá trubka se potom o kousek smrštila, takže už nebylo potřeba tak velké síly k její demontáži jako u předchozích vzorků a nehrozilo tak poškození tkalounů, které držely vinutí v požadovaném tvaru. Vzorek č. 5 je na obrázku 5.5.1.



Obr. 5.5.1 Funkční vzorek č. 5

Hodnoty změřené na vyrobeném vzorku č. 5

Měření páteho vyrobeného vzorku probíhalo zcela obdobně jako u předchozích vzorků 2 a 3, to znamená, že teplota byla opět měřena pouze na povrchu cívky. Schéma zapojení je stejné – viz obrázek 5.2.2. Postup měření a měřené veličiny byly také shodné. Hmotnost vzorku č. 5 je 0,87 kg.

Tab. 5.5.1 Parametry funkčního vzorku č. 5

L [mH]	δ_L [%]	R_{20} [Ω]	R_{150} [Ω]	C_{par} [μ F]	\varnothing CuL; (tepl. třída)	lak (typ; tepl. třída)	N [-]	d_i [mm]	d_o [mm]	l_{skut} [mm]
6,01	0,17	0,92	1,49	4,2	1,32; F	S1903; F	282	63	100	30,8

Tab. 5.5.2 Změřené a vypočítané hodnoty

Čas [hh:mm]	U_{ef} [V]	φ [°]	ΔP [W]	R_{Pt} [Ω]	T_{Pt} [°C]
00:00	12,2	63	36	109,5	24,7
00:30	13,3	55	50	141,2	107,0
00:45	13,7	52	54,8	149,2	127,8
01:00	13,8	52	55	150,8	132,0
01:15	13,9	52	55,6	155,3	143,6
01:30	14	52	56	158,1	150,9
01:45	14	51	57,3	159,5	154,6
02:00	14	51	57,3	158,0	150,7
02:15	14,1	51	57,7	158,7	152,5
02:30	14	51	57,3	158,2	151,2
02:45	14	51	57,3	158,5	152,0
03:00	14	51	57,3	158,6	152,2
03:15	14	51	57,3	158,7	152,5

Příklady výpočtu:

Ztrátový výkon cívky:

$$\Delta P = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos(\varphi) = 12,2 \cdot 6,5 \cdot \cos(63) = 36 \text{ W}$$

Teplota povrchu cívky:

$$T_{Pt} = \frac{R_{Pt} - 100}{0,385} = \frac{109,5 - 100}{0,385} = 24,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Součinitel přestupu tepla do okolí:

$$\alpha_{Th} = \frac{\Delta P}{S_p \cdot \Delta T} = \frac{57,3}{23,27 \cdot 10^{-3} \cdot (152 - 20)} = 18,65 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ kde:}$$

 S_p je povrch [m^2] kterým se cívka ochlazuje a vypočítá se:

$$S_p = l_{stř} \cdot o = 0,253 \cdot 0,092 = 23,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kde:}$$

 $l_{stř}$ je délka středního závitu [m], o obvod průřezu cívky změřený pomocí provázku [m].

Tab. 5.5.3 Použité měřicí přístroje a zařízení

regulovatelný autotransformátor	RT2,5 – 2,5A – 950VA – No 7689 – Křížík
oddělovací transformátor	220/24V – 500VA – ZSE Praha – IBC-05
ampérmetr	PU 510 – Metra Blansko
osciloskop	RIGOL DS1052E
ohmmetr (Pt – článek)	MIT 290 – Metra Blansko (čtyřvodičové připojení)
bočník	15A/60mV – 58P – No 996851

Z hlediska chyby vlastní indukčnosti je vzorek č. 5 jednoznačně nejlepší. Se svou hodnotou vlastní indukčnosti $L = 6,01 \text{ mH}$ totiž vykazuje chybu pouhých $0,17 \%$. To je zcela ojedinělý výsledek. Opět se ale ukazuje, že proudová hustota byla zvolena příliš vysoká. Cívka totiž měla uvnitř (podle měření na předchozím vzorku) teplotu až $172 \text{ } ^\circ\text{C}$. Cívka by tedy ani v tomto případě nemohla pracovat s předepsaným proudem delší dobu. Teplota uvnitř cívky byla překročena vzhledem k maximální povolené teplotě asi o 11% . Důležité ale je, že je na dvou posledních vzorcích vidět rozdíl v rozměrech, hmotnosti a tedy i ceně, což bylo

hlavním cílem výroby vzorků v různých teplotních třídách. Čtvrtý a pátý vzorek byly poddimenzovány, co se průměru drátu týče. Neznamená to ovšem, že bychom je mezi sebou nemohli porovnat. Všimněme si, že srovnáme-li překročení teplot v procentuálních hodnotách vůči maximální povolené teplotě, jsou čísla téměř stejná. Z toho vyplývá, že pokud bychom oba vzorky zhotovili každý z drátu o stupeň silnějšího, oba by již svojí vnitřní teplotou vyhověly. Je zřejmé, že cívka vyrobená v teplotní třídě H (nebo 200) bude menší, lehčí a levnější než cívka vyrobená v teplotní třídě F.

6 Shrnutí dosažených výsledků

V uvedené práci byly popsány základní veličiny magnetického pole a vztahy mezi nimi. Tento úvod byl podkladem pro následující popis a případné odvození vztahů pro výpočty vlastních indukčností vzduchových cívek.

Stěžejní částí práce je návrh vzduchové cívky s vlastní indukčností 6 mH a trvalým harmonickým proudem s efektivní hodnotou $I_{ef} = 6,5 A$. Výchozím vztahem pro návrh cívky byl Patočkův vzorec, který zahrnuje také minimalizaci rozměrů cívky při zachování její maximální vlastní indukčnosti. Minimalizací rozměrů cívky totiž dosáhneme i minimalizace nákladů spojených s její výrobou, protože největší část ceny cívky tvoří cena mědi.

Výsledek tohoto výpočtu byl porovnán s několika dalšími metodami návrhu. Navržená cívka má $N = 273$ závitů, vnitřní průměr $d_i = 63 mm$ a délku $l = 30 mm$. Tyto hodnoty byly postupně dosazeny do vztahů, které pocházejí od dalších autorů, a které řeší vlastní indukčnost. Zároveň byly též použity jako vstupní hodnoty pro kontrolní výpočet metodou konečných prvků. Po dosazení do Nagaokova vztahu vyšla vlastní indukčnost cívky $L = 5,06 mH$, což odpovídá chybě 15,6 %. Využitím Wheelerova vztahu dostáváme vlastní indukčnost cívky $L = 5,87 mH$, což odpovídá chybě 2,2 %. Při použití nomogramu vychází vlastní indukčnost cívky $L = 7,5 mH$, což odpovídá chybě 25 %. Využitím Mayerova vztahu dostáváme vlastní indukčnost cívky $L = 1 mH$, což odpovídá chybě 83 %. Diskuze těchto výsledků je uvedena v textu práce.

Kontrola vlastní indukčnosti navržené cívky byla provedena metodou konečných prvků. Tato metoda umožňuje i zpřesnění návrhu pomocí vyřešení většího počtu MKP modelů. Za tímto účelem byl vytvořen skript, který umožňuje snadnou změnu geometrie modelu a opakované spuštění výpočtu. Ze získaných výsledků vybereme cívku s nejlepšími parametry. Touto metodou lze chybu návrhu snížit na desetiny procenta.

Kontrola oteplení navržené cívky je opět provedena pomocí metody konečných prvků. Je potřeba zvážit, nakolik je tato kontrola relevantní, neboť je potřeba odhadnout řadu parametrů, které jsou závislé na technologii výroby, použitých materiálech a pracovní poloze cívky. Měřením funkčních vzorků je však možné tyto parametry dosadit do výpočtu

s dostatečnou přesností a tím matematický model vylepšit. Výsledkem je dosažení dobrého souladu mezi vypočítanou teplotou a teplotou reálného vzorku.

Dále bylo vytvořeno pět funkčních vzorků, které jsou detailně popsány v páté kapitole. Na všech vzorcích bylo provedeno měření vlastní indukčnosti. Maximální odchylka od zadané hodnoty byla 16 % (vzorek č. 2), minimální odchylka byla 0,17 % (vzorek č. 5). U některých vzorků byla provedena oteplovací zkouška. Výsledky měření jsou uvedeny v popisu jednotlivých vzorků.

Pro návrh cívky se osvědčil postup vycházející z Patočkova vztahu pro minimalizaci rozměrů cívky. Druhým krokem návrhu je zpřesnění rozměrů a počtu závitů cívky pomocí MKP modelu. Dále můžeme ověřit oteplení cívky, pokud máme k dispozici relevantní údaje o použitých materiálech. Na základě měření funkčních vzorků lze říci, že postup návrhu je precizní a dosahuje vynikajících hodnot (vzorek č. 5).

7 Seznam literatury a použitých zdrojů

- [1] VOBECKÝ, J., ZÁHLAVA, V. Elektronika – součástky a obvody, principy a příklady. Praha: Grada Publishing, a.s., 2005
- [2] BLAHOVEC, A. Základy elektrotechniky v příkladech a úlohách. Praha: SNTL, 1989
- [3] MAYER, D. Aplikovaný elektromagnetismus. České Budějovice: Kopp, 2012
- [4] ŠROUBOVÁ, L. Základy teoretické elektrotechniky (21. část). *Elektro : odborný časopis pro elektrotechniku*, 2016, roč. 26, č. 5, s. 61. ISSN: 1210-0889
- [5] BARTOŠ, V., ČERVENÝ, J., HRUŠKA, J., KOTLANOVÁ, A., SKALA, B. Elektrické stroje. Západočeská univerzita v Plzni, 2011
- [6] BARTOŠ, V. Teorie elektrických strojů. Západočeská univerzita v Plzni, 2009
- [7] JAVORSKÝ, L., BOBEK, A., MUSIL, R. Základy elektrotechniky pro SPŠ elektrotechnické. Praha: SNTL, 1970
- [8] CHLÁDEK, J., LAMMERANER, J. Elektrické stroje na stejnosměrný proud. Praha: SNTL, 1957
- [9] VOŽENÍLEK, L., ŘEŠÁTKO, M. Základy elektrotechniky I pro 1. ročník SOU elektrotechnických. Praha: SNTL, 1984
- [10] BENEŠOVÁ, Z., MAYER, D. Základní příklady z teorie elektromagnetického pole. Západočeská univerzita v Plzni, 2011
- [11] PATOČKA, M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřící technice a silnoproudé elektrotechnice. VUT Brno: Vitium, 2011
- [12] NAGAOKA, H. The inductance coefficients of solenoids. *Journal of the College of Science*, 1909
- [13] WHEELER, Harold A. Simple inductance formulas for radio coils. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 1928, 16.10: 1398-1400.
- [14] ČIHÁK, V., a kol. Malá technická encyklopedie. SNTL, 1966
- [15] DVOŘÁKOVÁ, V., a kol. Radiotechnické nomogramy. Svaz pro spolupráci s armádou, 1953.
- [16] FAKTOR, Z. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. BEN, 2002.
- [17] KNOTEK, J. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. SNTL, 1970.
- [18] HRADISKÝ, Z. Radiotechnická štafeta. Mladá fronta, 1983.

- [19] VONDRÁŠEK, F., LANGHAMMER, J., PEROUTKA, A., MĚSÍČEK, J., MOLNÁR, J. Výkonová elektronika: Projektování výkonových polovodičových měničů - vybrané stati, Svazek 6. Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [20] KREJČIŘÍK, A. Lineární napájecí zdroje. BEN, 2005.
- [21] MRAVEC, R. Elektrické stroje a přístroje I. Elektrické stroje. Praha: SNTL, 1982
- [22] CIGÁNEK, L., BAUER, M. Elektrické stroje a přístroje. Praha: SNTL, 1955
- [23] ROSA, E. B., The self and mutual inductances of linear conductors, Bulletin of the Bureau of Standards, vol. 4, no. 2, Washington, 1907
- [24] DELLINGER, J. H., et al. Radio instruments and measurements. *Circular C74*. National Bureau of Standards, Washington, D: C, 1937
- [25] Výpočet vícevrstvé cívky s pravoúhlým jádrem. <http://coil32.net> [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://coil32.net/multilayer-rectangular.html>

8 Přílohy

8.1 Skript pro výpočet vlastní indukčnosti cívky

```

newdocument(0)                --založí nový dokument
mi_probdef(0,"millimeters","axi",1E-8,10,1) --definuje základní parametry
                                   řešeného problému
showconsole()                 --zobrazí konzoli
clearconsole()                --vyčistí konzoli od
                                   předchozích zpráv
navez = "vzorek_4"           --název pro ukládání
                                   jednotlivých souborů
mi_saveas("save.fem")         --uložení
vystup=openfile("../navez..txt", "w") --příprava (otevření)
                                   výstupního souboru

---zadávání vstupních hodnot pro výpočet---

Np = 285                      --počet závitů cívky (počátek) [z]
Nk = 295                      --počet závitů cívky (konec) [z]
dN = 1                        --krok závitů cívky [z]
dp = 1.25                     --průměr drátu (počátek) [mm]
dk = 1.25                     --průměr drátu (konec) [mm]
dd = 1                        --krok průměru drátu [mm]
                                   --délku cívky je nutné zadávat tak, aby po dělení průměrem drátu
                                   vyšlo celé číslo a krok délky cívky musí odpovídat průměru
                                   drátu včetně izolace
lp = 30                       --délka cívky (počátek) [mm]
lk = 30                       --délka cívky (konec) [mm]
dl = 1.56                     --krok délky cívky [mm]
R1p = 31.5                    --vnitřní poloměr cívky (počátek) [mm]
R1k = 31.5                    --vnitřní poloměr cívky (konec) [mm]
dR1 = 1                       --krok vnitřního poloměru cívky [mm]
m = 0.01                     --velikost sítě pro materiály [mm]
dif = 0.035                   --diference mezi závitů cívky (tloušťka laku) [mm]
k = 500                       --poloměr okrajové kružnice [mm]
p = 0                         --index pro odlišení jednotlivých výpočtů [-]
u = 0                         --index pro mazací cyklus [-]
n1 = 0                        --index pro výpočet počtu vrstev [-]
proud = 6.5                   --efektivní hodnota proudu cívkou [A]
gama_cu = 56.18              --vodivost mědi [MS/m]

```

```

---příprava výstupního souboru (výpis veličin a jednotek v prvním řádku)---
--příprava prvního řádku .txt souboru
write(vystup,"p [-]","\t","L [H]","\t\t\t","N [z]","\t\t")
--příprava prvního řádku .txt souboru
write(vystup,"d [mm]","\t\t","dif [mm]","\t","l [mm]","\t\t")
--příprava prvního řádku .txt souboru
write(vystup,"2R1 [mm]","\t","2R2 [mm]","\t","dN [z]","\t\t")
--příprava prvního řádku .txt souboru
write(vystup,"dd [mm]","\t\t","dl [mm]","\t\t","dR1 [mm]","\t")
--příprava prvního řádku .txt souboru
write(vystup,"I [A]","\t\t\t","gama_cu [MS/m]","\t\t","Sv [mm^2]","\t\t")
--příprava prvního řádku .txt souboru
write(vystup,"J [A/mm^2]","\t\t","V [-]","\t\t","v [-]","\t\t")
--příprava prvního řádku .txt souboru
write(vystup,"Wm [J]","\n")

---cykly pro přetváření geometrií cívek---

for R1=R1p,R1k,dR1      --cyklus pro změnu vnitřního poloměru cívky [1]
do

for l=lp,lk,dl          --cyklus pro změnu délky cívky [2]
do

for d=dp,dk,dd          --cyklus pro změnu průměru drátu [3]
do
  g = (1.732/2)*d        --výpočet kroku vrstev cívky [mm]
                        --vzdálenost sousedních vrstev (středů závitů)

---výpočet proudové hustoty---

Sv = pi*((d-2*dif)^2)/4 --výpočet průřezu vodiče [mm^2]
J = proud/Sv            --výpočet proudové hustoty [A/mm^2]

---definování materiálů---

mi_addmaterial("air",1,1,0)          --definice materiálu vzduch
mi_addmaterial("Cu",1,1,0,J,gama_cu) --definice materiálu měď

---okrajové podmínky---

mi_addboundprop("okoli",0,0,0,0,0,0,0,0,0) --definice okrajové podmínky
                                           --nulový vektorový potenciál

```

```

for N=Np,Nk,dN          --cyklus pro změnu počtu závitů cívky [4]
do
  n = 1                 --index pro počet závitů cívky [-]
  dj = 1                --index pro výpočet parity jednotlivých vrstev
                        (lichá/sudá) [-]
  Nv = 1/d              --počet závitů v jedné vrstvě [z]

for kn=1,N,1           --cyklus pro výpočet počtu vrstev cívky [kn]
do
  mod = kn-floor(kn/2)*2      --výpočet "modulo" [1 nebo 0]
  if(mod==1)                 --podmínka řešící paritu vrstvy
    then
      n1 = n1 + Nv           --přičtení počtu závitů liché vrstvy [z]
    else
      n1 = n1 + (Nv-1)      --přičtení počtu závitů sudé vrstvy [z]
    end
  end --[if]

  if(n1>=N)
    then
      break
    end --[if]
  V=(kn+1)                   --přiřazení počtu vrstev do proměnné V [-]
end                           --[kn]

  v = floor(V/2)             --počet sudých vrstev [-]

---tvorba geometrie dle zadaných parametrů, přiřazení materiálů a okrajových
podmínek---

for j=(R1+d/2),((R1+d/2)+((V+1)*g)),g  --vnější cyklus zajišťuje posun po
                                         vrstvách (osa "r") [5]
do
  i = d/2                     --zavedení proměnné "i" pro vnitřní
                              cyklus [mm]
  h = 1-((d-dif)/2)           --zavedení proměnné "h" pro horní hranici vnitřního
                              cyklu [mm]
  mod = dj-floor(dj/2)*2      --výpočet "modulo" [1 nebo 0]
  print("mod=",mod)          --výpis hodnoty "mod" (nabývá 0 nebo 1)
  if(mod==0)                 --kontrola parity vrstvy
    then
      i = i+d/2               --posun o d/2 pro sudé vrstvy v ose "z" [mm]
      h = 1-(d-dif)           --odstranění nejvýše položeného závitů pro sudé
                              vrstvy [mm]
    end
  end --[if]

```



```

print("h=",h,"[mm]")      --výpis hodnoty "h" [mm]

for i=i, h, d              --vnitřní cyklus zajišťuje posun v ose "z" [6]
do
  n = n+1                 --zavedení proměnné "n" pro počet vytvořených
                          zátvitů [z]
                          --pozor! n nabývá vždy hodnoty o 1 více než je
                          skutečný počet

  print("j=",j,"[mm]")    --výpis proměnné "j" (posun v ose "r") [mm]
  print("i=",i,"[mm]")    --výpis proměnné "i" (posun v ose "z") [mm]

  mi_addblocklabel(j,i)   --popisový blok ve středu každého vodiče
                          (drátu)
  mi_selectlabel(j,i)     --výběr vytvořeného popisového bloku
  mi_setblockprop("Cu",1,0,0,0,0) --přiřazení materiálu "měď" s
                          velikostí sítě "m"
  mi_clearselected()      --zrušení výběru popisového bloku
  mi_addnode(j-d/2+dif,i) --bod pro tvorbu kružnice vodiče (závitu)
  mi_addnode(j+d/2-dif,i) --bod pro tvorbu kružnice vodiče (závitu)
  mi_addarc(j+d/2-dif,i,j-d/2+dif,i,180,5) --vložení horní
                          půlkružnice
  mi_addarc(j-d/2+dif,i,j+d/2-dif,i,180,5) --vložení spodní
                          půlkružnice

  print("n=",n,"[z+1] !") --výpis proměnné "n" (počet již vytvořených
                          zátvitů) [z]
  print("N=",N,"[z]")     --výpis proměnné "N" (požadovaný celkový
                          počet zátvitů) [z]

  if(n==(N+1))            --podmínka pro ukončení vykreslování dalších zátvitů
  then
    break                 --při splnění podmínky vyskočení z for cyklu (směr
                          "z")
  end
end                        --[if]
                          --[6]

dj = dj+1                 --zvětšení indexu pro výpočet parity [-]
if(n==(N+1))              --podmínka pro ukončení vykreslování dalších zátvitů
then
  break                   --při splnění podmínky vyskočení z for cyklu (směr
                          "r")
end
end                        --[if]
                          --[5]

mi_addnode(0,-k+1/2)      --vloží bod pro tvorbu okolí
mi_addnode(0,k-1/2)      --vloží bod pro tvorbu okolí

```

```

mi_addsegment(0,-k+1/2,0,k-1/2)    --vloží úsečku pro tvorbu okolí
mi_addarc(0,-k+1/2,0,k-1/2,180,1)  --vloží půlkružnici pro tvorbu okolí
mi_addblocklabel(R1/2,0)           --popisový blok uvnitř cívky
mi_selectlabel(R1/2,0)             --výběr vytvořeného popisového bloku
mi_setblockprop("air",0,2,0,0,0)   --přiřazení materiálu "vzduch" s velikostí
                                     síť "m"
mi_clearselected()                 --zrušení výběru popisového bloku

mi_selectsegment(0,-k+1/2,0,k-1/2) --výběr okrajové úsečky
mi_setsegmentprop("okoli",0,1,0)   --přiřazení okrajové podmínky "okolí"
mi_clearselected()                 --zrušení výběru okrajové úsečky
mi_selectarcsegment(0,-k+1/2)      --výběr okrajového oblouku
mi_setarcsegmentprop(10,"okoli",0) --přiřazení okrajové podmínky "okolí"
mi_clearselected()                 --zrušení výběru okrajového oblouku

---výpočet vnějšího poloměru cívky---

R2 = ((R1+d/2)+(V-1)*g)+d/2        --výpočet vnějšího poloměru cívky [mm]

---rozlišení jednotlivých výpočtů---

p = p+1                            --proměnná pro celkový počet výpočtů (číslování souborů při
                                     ukládání) [-]

---uložení---

mi_saveas("".navez."".p.".fem")

---tvorba sítě---

mi_createmesh()                    --vytvoří síť

---výpočet elmg. pole---

mi_analyze()                       --výpočet
mi_loadsolution()                  --načtení řešení
mi_saveas("".navez."".p.".fem")    --uložení

---zobrazení výsledků---

print("Sv=",Sv,"[mm^2]")           --výpis průřezu vodiče [mm^2]
print("J=",J,"[A/mm^2]")          --výpis proudové hustoty [A/mm^2]

mo_showdensityplot(1,0,0.02,0,"bmag") --zobrazení amplitudy B [T]
mo_groupselectblock()             --výběr celého prostředí (vzduch+Cu)

```

```

wm, energie=mo_blockintegral(2)    --výpočet energie mg. pole [J]
mo_clearblock()                   --zrušení výběru bloku
mo_selectblock(R1+d/2,d/2)         --výběr plochy jednoho závitů
I, proud=mo_blockintegral(7)      --výpočet proudu [A]
mo_clearblock()                   --zrušení výběru bloku
L = (2*wm)/(I^2)                  --výpočet vlastní indukčnosti [H]

print("wm=",wm,"[J]")             --výpis vypočtené energie mg. pole [J]
print("I=",I,"[A]")               --výpis vypočteného proudu [A]
print("L=",L,"[H]")               --výpis vypočtené indukčnosti [H]

---zápis hodnot do souboru---

write(vystup,p, "\t")             --zápis čísla výpočtu do souboru [-]
write(vystup,L, "\t")             --zápis vypočtené indukčnosti do souboru [H]
write(vystup,N, "\t\t")          --zápis počtu závitů do souboru [z]
write(vystup,d, "\t\t")          --zápis průměru drátu do souboru [mm]
write(vystup,dif, "\t\t")        --zápis tloušťky izolace drátu [mm]
write(vystup,l, "\t\t")          --zápis délky cívky do souboru [mm]
write(vystup,R1*2, "\t\t")        --zápis vnitřního průměru cívky do souboru [mm]
write(vystup,R2*2, "\t")         --zápis vnějšího průměru cívky do souboru [mm]
write(vystup,dN, "\t\t")         --zápis kroku počtu závitů cívky do souboru [z]
write(vystup,dd, "\t\t")         --zápis kroku průměru drátu cívky do souboru [mm]
write(vystup,dl, "\t\t")         --zápis kroku délky cívky do souboru [mm]
write(vystup,dR1, "\t\t")        --zápis kroku vnitřního poloměru cívky do souboru
                                [mm]
write(vystup,I, "\t")            --zápis proudu cívkou do souboru [A]
write(vystup,gama_cu, "\t\t\t")  --zápis vodivosti mědi do souboru [MS/m]
write(vystup,Sv, "\t")           --zápis průřezu drátu do souboru [mm^2]
write(vystup,J, "\t")            --zápis proudové hustoty cívky do souboru [A/mm^2]
write(vystup,V, "\t\t")          --zápis celkového počtu vrstev cívky do souboru [-]
write(vystup,v, "\t\t")          --zápis počtu sudých vrstev cívky do souboru [-]
write(vystup,wm, "\n")           --zápis energie magnetického pole cívky do souboru
                                [J]

mo_zoom(R1,0,R1+V*d,l)           --zoom
mo_savebitmap("magneticke_pole"..p.."png") --uložení kontrolního obrázku

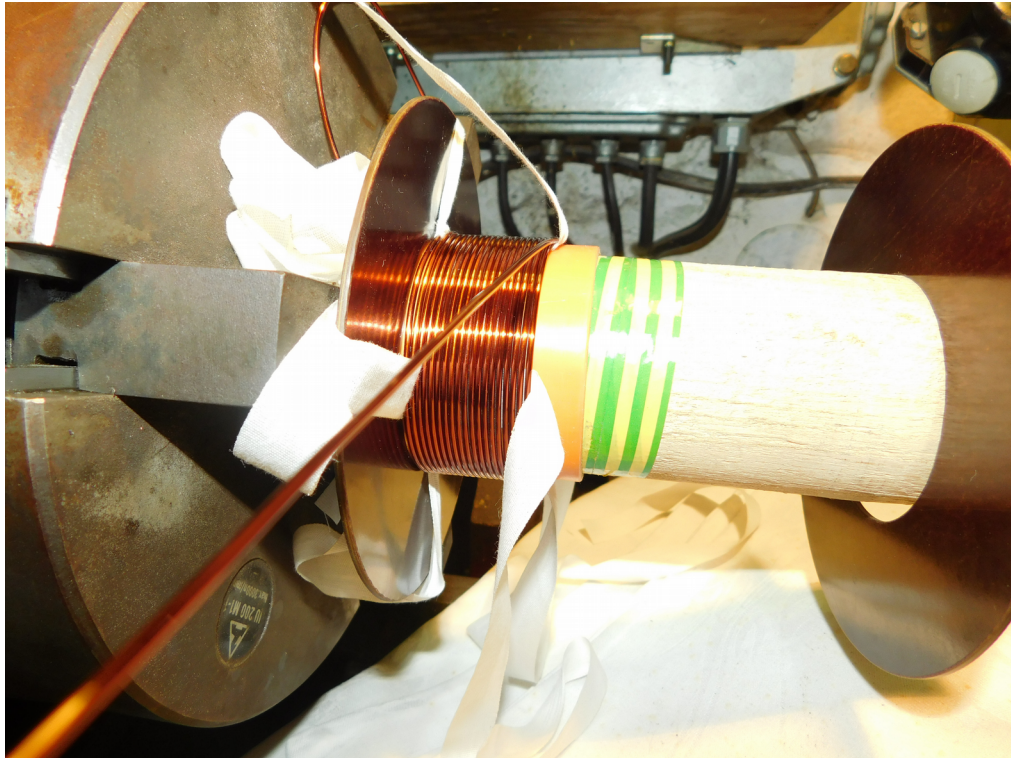
for u=1,3*N,1                     --cyklus pro vymazání předchozí geometrie
                                [7]
do
    mi_selectnode(R1+V*d/2,l/2)   --výběr bodů nejbliže středu cívky
    mi_deleteselectednodes()     --vymazání vybraných bodů
end
                                --[7]

```

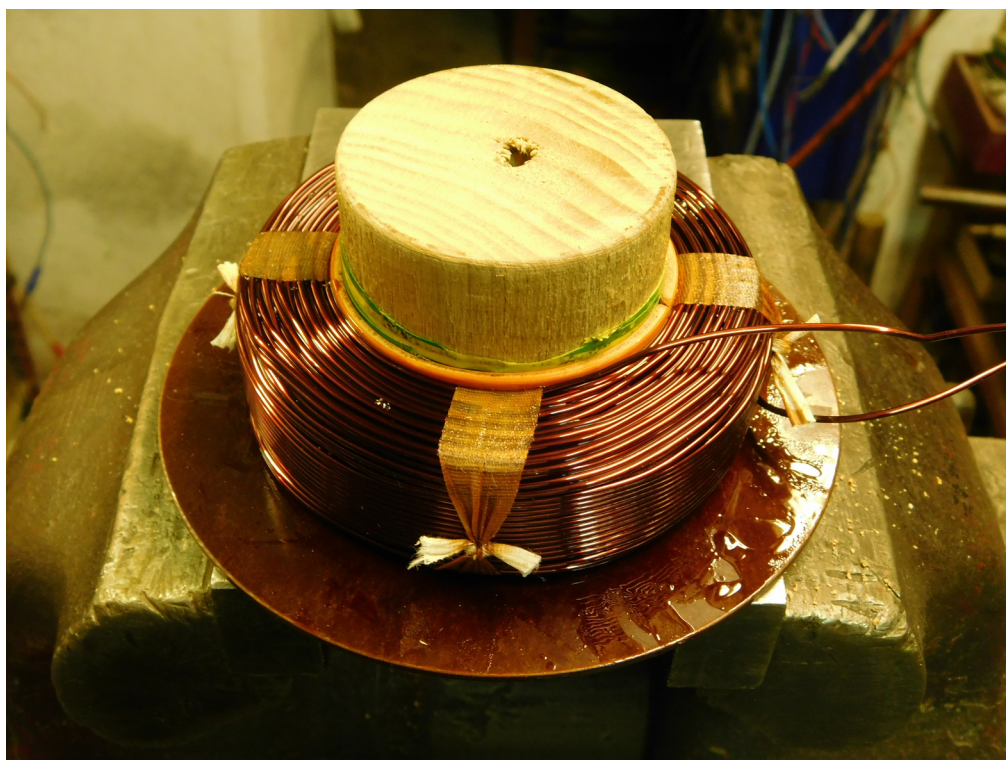
```
for u=1,N+1,1                                --cyklus pro vymazání předchozí geometrie
                                             [8]
do
  mi_selectlabel(R1+V*d/2,1/2)              --výběr popisového bloku nejbliže středu
                                             cívky
  mi_deleteselectedlabels()                --vymazání vybraných popisových bloků
end --[8]
end --[4]
end --[3]
end --[2]
end --[1]

closefile(vystup)                            --uzavření souboru
```

8.2 Fotografie z výroby a měření funkčních vzorků



Obr. 8.2.1 Navíjení cívky



Obr. 8.2.2 Rozebírání provizorní kostry



Obr. 8.2.3 Měření funkčního vzorku č. 3