

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

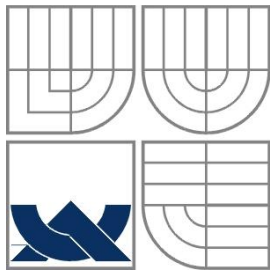
VÝKONOVÉ TLUMIVKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MILAN ŠKRLA

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

Výkonové tlumivky

POWER CHOKES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MILAN ŠKRLA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. MIROSLAV PATOCKA

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Milan Škrla

ID: 98408

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Výkonové tlumivky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypracujte postup optimálního návrhu vzduchových výkonových cívek a tlumivek s feromagnetickým obvodem a vzduchovou mezerou. Posuďte oba typy cívek z technicko-ekonomického hlediska.
2. Navrhněte a realizujte cívky zvolených parametrů.
3. U realizovaných cívek porovnejte parametry změřené s parametry vypočítanými.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práce na téma výkonové tlumivky analyzuje postupy návrhů vzduchových výkonových cívek a tlumivek s feromagnetickým obvodem a vzduchovou mezerou. Realizování tlumivek ověřilo přesnost vypočítaných parametrů oproti změřeným. Výstupem této analýzy jsou odvozeny případné korekce k postupu návrhu. V práci jsou uvedeny optimalizace návrhů na co nejmenší objem, hmotnost, ekonomičnost a jejich porovnání z uvedených hledisek.

Abstract

This thesis dissertate power reactors and analyses techniques of an air-core power coils and inductors with ferromagnetic circuit and an air gap. Construction of the inductors verified the accuracy of the calculated values against the measured parameters. According to the outcome of this analysis, corrections of the design process are derived. Thesis design optimization to minimize size, weight, efficiency and in comparsion of these two factoctors.

Klíčová slova

Výkonová tlumivka; kotoučová vzduchová cívka; jednovrstvá válcová vzduchová tlumivka; tlumivka s feritovým jádrem a vzduchovou mezerou; komplexní permeabilita.

Keywords

Power inductor; circular air-core coil; single - layer cylindrical air-cored reactor; inductor with ferritic kernel plus air gap; complex permeability.

Bibliografická citace

ŠKRLA, M. Výkonové tlumivky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Výkonové tlumivky jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

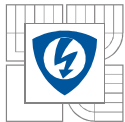
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce doc. Dr. Ing. Miroslavu Patočkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

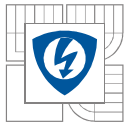
V Brně dne

Podpis autora

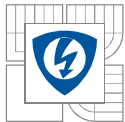


OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
ÚVOD.....	11
1 ZÁKLADNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁKONY	12
2 POŽADAVKY NA NÁVRH VÝKONOVÝCH TLUMIVEK.....	16
3 VSTUPNÍ ÚDAJE PRO NÁVRH TLUMIVEK.....	16
3.1 ZADÁNA INDUKČNOST L , EFEKTIVNÍ PROUD I_{EF}	16
3.2 ZADÁNA INDUKČNOST L , EFEKTIVNÍ PROUD I_{EF} , POVRCHOVÉ OTEPLENÍ ΔT	16
3.3 ZADÁNA INDUKČNOST L A ODPOR VINUTÍ R_{CU}	17
3.4 DOPLŇUJÍCÍ ÚDAJE PRO NÁVRH.....	17
4 VINUTÍ	17
4.1 ČINITEL PLNĚNÍ VINUTÍ.....	17
4.1.1 ČINITEL TVARU	17
4.1.2 ČINITEL IZOLACE	18
4.1.3 ČINITEL PŘÍDAVNÝ	18
4.1.4 ČINITEL CHLADICÍCH KANÁLŮ	19
4.2 SKIN-EFFECT	19
4.3 OTEPLENÍ VINUTÍ.....	19
4.3.1 ČINITEL PŘESTUPU TEPLA DO OKOLÍ	20
4.3.2 TEPLA ZÁVISLOST MĚRNÉHO ODPORU VODIČE	20
4.3.3 ZATĚŽOVACÍ ČINITEL.....	20
4.3.4 TEPELNÝ VÝKON VINUTÍ.....	21
4.4 PROUDOVÁ HUSTOTA.....	21
4.5 PARAZITNÍ KAPACITA	21
4.5.1 MEZIZÁVITOVÁ KAPACITA	22
4.5.2 MEZIVRSTVOVÁ KAPACITA.....	22
4.5.3 REZONANČNÍ KMITOČET	22
4.6 JAKOST Q	23
5 FEROMAGNETICKÝ OBVOD.....	23
5.1 MAGNETICKÝ OBVOD	23
5.2 FEROMAGNETICKÉ MATERIÁLY	25
5.2.1 ZTRÁTY VÍŘIVÝMI PROUDY	26
5.2.1 HYSTEREZNÍ ZTRÁTY	26
5.3 KOMPLEXNÍ PERMEABILITA	26
5.3.1 MODEL KOMPLEXNÍ PERMEABILITY – POSTUP VYPRACOVÁNÍ.....	27
5.3.2 NAMĚŘENÉ HODNOTY KOMPLEXNÍ PERMEABILITY	28
5.4 ČINITEL PLNĚNÍ ŽELEZA VE FEROMAGNETICKÉM JÁDŘE	29

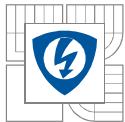


5.5 VZDUCHOVÁ MEZERA.....	30
6 JEDNOVRSTVÁ VÁLCOVÁ VZDUCHOVÁ CÍVKA - OPTIMÁLNÍ NÁVRH.....	30
7 KOTOUČOVÁ VZDUCHOVÁ CÍVKA - OPTIMÁLNÍ NÁVRH	32
8 TLUMIVKA NA JÁDRECH TYPU EI $a \times a$.....	34
9 TLUMIVKA S TYČOVÝM JÁDREM.....	35
10 REALIZACE TLUMIVEK S TYČOVÝM JÁDREM.....	35
10.1 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ TLUMIVEK S TYČOVÝM JÁDREM.....	36
10.2 MĚŘENÍ MAGNETICKÉ VAZBY SÉRIOVĚ ZAPOJENÝCH TLUMIVEK S TYČOVÝM JÁDREM	37
10.2.1 TLUMIVKY SÉRIOVĚ SPOJENÉ	38
10.2.2 TLUMIVKY ANTISÉRIOVĚ SPOJENÉ.....	39
10.2.3 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ MAGNETICKÉ VAZBY.....	39
11 REALIZACE KOTOUČOVÉ VZDUCHOVÉ TLUMIVKY	39
11.1 NAMĚŘENÉ ROZMĚRY KOTOUČOVÉ CÍVKY	40
11.2 NAMĚŘENÉ PARAMETRY KOTOUČOVÉ CÍVKY	41
11.3 VYPOČTENÉ PARAMETRY KOTOUČOVÉ CÍVKY.....	42
11.4 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ S VYPOČTENÝMI.....	44
11.5 KOREKCE PRO VÝPOČET PARAZITNÍ KAPACITY.....	44
12 POROVNÁNÍ RŮZNÝCH TYPŮ TLUMIVEK.....	44
12.1 NÁVRH JEDNOVRSTVÉ VÁLCOVÉ VZDUCHOVÉ TLUMIVKY	45
12.2 NÁVRH VÁLCOVÉ TLUMIVKY S TYČOVÝM JÁDREM.....	45
12.3 NÁVRH KOTOUČOVÉ VZDUCHOVÉ TLUMIVKY – VINUTO ČU-LANEM.....	46
12.4 NÁVRH KOTOUČOVÉ VZDUCHOVÉ TLUMIVKY – VINUTO AL-PLECHEM	47
12.5 NÁVRH KOTOUČOVÉ VZDUCHOVÉ TLUMIVKY – VINUTO ČU-PLECHEM	48
12.6 VÝHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH TLUMIVEK	48
12.7 ZÁVISLOST PARAMETRŮ KOTOUČOVÉ VZDUCHOVÉ TLUMIVKY NA ZMĚNĚ ČINITELE PLNĚNÍ	51
13 ZÁVĚR.....	52
LITERATURA	53



SEZNAM OBRÁZKŮ

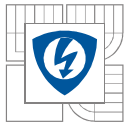
<i>Obr. 1-1: Zobrazení magnetické indukce v toroidní cívce. [8]</i>	13
<i>Obr. 1-2: Vektor magnetizace ve válci zmagnetizovaného materiálu. [8]</i>	14
<i>Obr. 1-3: Lineární diskrétní magnetický obvod cívky. [2]</i>	14
<i>Obr. 1-5: Linearizovaný magnetický model. [2]</i>	15
<i>Obr. 4.1-1: Činitel plnění vinutí. [3]</i>	17
<i>Obr. 4.1.1-1: Sousední vrstvy vinuty v opačném směru. [3]</i>	17
<i>Obr. 4.1.1-2: Sousední vrstvy vinuty ve stejném směru. [3]</i>	18
<i>Obr. 4.1.1-3: Vodič obdélníkového průřezu. [3]</i>	18
<i>Obr. 4.1.1-4: Vinutí navinuto z pásoviny. [3]</i>	18
<i>Obr. 4.1.1-5: Vinutí navinut z vf. lan. [3]</i>	18
<i>Obr. 4.1.4-1: Znázornění chladících kanálku ve vinutí. [3]</i>	19
<i>Obr. 4.6-1: Náhradní obvod cívky [10]</i>	23
<i>Obr. 5.1-1: Magnetizační charakteristiky [2]</i>	24
<i>Obr. 5.1-2: Charakteristiky v nelineárním magnetickém obvodu. [2]</i>	24
<i>Obr. 5.2-1: Hysterezní smyčka magneticky měkkého materiálu. [2]</i>	25
<i>Obr. 5.3-1: Změřená komplexní permeabilita pro manganato-zinečnaté ferity s permeabilitou $\mu_{r,rf} \cong 1800$ a 2400. [2]</i>	26
<i>Obr. 5.3-2: Náhradní zapojení cívky. [2]</i>	27
<i>Obr. 5.3.2-1: Model komplexní permeability.</i>	29
<i>Obr. 6-1: Řez jednovrstvou vzduchovou cívkou. [3]</i>	30
<i>Obr. 7-1: Řez kotoučovou vzduchovou cívkou. [3]</i>	32
<i>Obr. 7-1: Řez jádrem EI a \times a. [2]</i>	34
<i>Obr. 9-1: Tlumivka s jádrem složeným z toroidů a jednovrstvým vinutím.</i>	35
<i>Obr. 10.1-1: Graf závislosti λ_v na délce jádra z toroidů.</i>	36
<i>Obr. 10.2-1: Řez měřenou tlumivkou.</i>	37
<i>Obr. 10.2-2: Řez měřenou tlumivkou.</i>	37
<i>Obr. 10.2-3: Řez měřenou tlumivkou.</i>	38
<i>Obr. 10.2.1-1: Zapojení tlumivek a LRC metru.</i>	38
<i>Obr. 10.2.1-2: Sériové spojení tlumivek.</i>	39
<i>Obr. 10.2.2-1: Antisériové spojení tlumivek.</i>	39
<i>Obr. 11-1: Rozložení os a pozic na cívce.</i>	40
<i>Obr. 12.6-1: Porovnání celkové velikosti vinutí navrhovaných tlumivek.</i>	49



<i>Obr. 12.6-2: Porovnání velikosti použitého vodiče ve vinutí navrhovaných tlumivek.</i>	49
<i>Obr. 12.6-4: Porovnání hmotnosti vodiče ve vinutí navrhovaných tlumivek.</i>	50
<i>Obr. 12.6-5: Porovnání ceny vodiče ve vinutí navrhovaných tlumivek.</i>	50
<i>Obr. 12.7-1: Graf V_{Cu} a V_v v závislosti na $k_{p,Cu}$.</i>	51

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5.3.2-1: Parametry tlumivky pro měření komplexní permeability.</i>	28
<i>Tab. 5.1.3-1: Tabulka k_{pt} pro odstupňované průřezy sloupků.</i>	30
<i>Tab. 10-1: Tabulka délek měřených skládaných feritových jader.</i>	35
<i>Tab. 10.1-1: Tabulka vyhodnocených hodnot z měření.</i>	36
<i>Tab. 10.2.1-1: Naměřené hodnoty.</i>	38
<i>Tab. 11.1-1: Určení průměrného rozměru b.</i>	41
<i>Tab. 11.2-1: Tabulka naměřených hodnot indukčnosti cívky.</i>	41
<i>Tab. 12.2-1: Hodnoty N na délce tlumivky s tyčovým jádrem.</i>	46
<i>Tab. 12.6-1: Tabulka vypočtených hodnot.</i>	48
<i>Tab. 12.7-1: Parametry kotoučové vzduchové tlumivky na $k_{p,Cu}$.</i>	51



ÚVOD

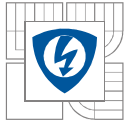
Práce se zabývá analyzováním návrhů výkonových tlumivek. V teoretické části jsou uvedeny základní elektromagnetické vztahy, požadavky na zadání pro návrh tlumivky, rozbor vinutí, rozbor feromagnetického obvodu a analýza následujících návrhů:

- Vzduchové válcové cívky s jednovrstvým vinutím.
- Vzduchové kotoučové cívky.
- Tlumivky s tyčovým jádrem a jednovrstvým vinutím.
- Tlumivky na jádrech EI $a \times a$.

Práce se zaměřovala na optimalizovaný návrh výkonových tlumivek, což znamenalo nalézt takový postup návrhu, kterým se docílí minimalizace objemu vinutí, celkového objemu, hmotnosti či ceny. Pro analyzování uvedených předpokladů se praktická část práce zabývala těmito cíly:

- Ověřením přesnosti Wheelerova vzorce pro výpočet indukčnosti vzduchové kotoučové cívky.
- Optimálním návrhem vzduchové kotoučové cívky.
- Upřesněním postupu pro výpočet parazitní kapacity vzduchové kotoučové cívky.
- Vypracováním postupu pro návrh vzduchové válcové jednovrstvé cívky podle Wheelerova vzorce.
- Vypracováním postupu pro návrh tlumivky s feromagnetickým tyčovým jádrem a jednovrstvým vinutím, realizace a ověření parametrů měření.
- Matematickým model komplexní permeability magneticky měkkých feritových materiálů.
- Návrh realizovatelných tlumivek na jednotné zadání $L = 2,4 \mu\text{H}$, $I_{\text{ef}} = 750\text{A}$, $f = 100\text{kHz}$.
Všechny návrhy porovnat z objemového, hmotnostního a ekonomického pohledu.

Měření na realizovaných tlumivkách probíhalo na přesném LRC metru QuadTech 7600 precision (dále jen LRC metr) s udávanou přesností měření 0,05% podle údajů výrobce [7]. V závěru práce se nachází zhodnocení dosažení uvedených cílů.



1 ZÁKLADNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁKONY

Uvedené základní elektromagnetické zákony jsou převzaty ze skript [2], [8] a [10]. Pro lineární či nelineární cívky platí, že spřažený magnetický tok $\Psi(t)$ cívky je integrálem jejího svorkového napětí $u(t)$. Toto vyjadřuje indukční zákon v integrální podobě

$$\Psi(t) = \Psi_0 + \int u(t)dt, \quad [\text{Wb}; \text{V}\cdot\text{s}], \quad (1-1)$$

kde Ψ_0 je obecná počáteční integrační konstanta neurčitého integrálu. Pokud derivujeme (1-1) podle času, můžeme indukční zákon napsat v diferenciálním tvaru

$$u(t) = \pm \frac{d\Psi(t)}{dt}. \quad (1-2)$$

Znaménko před zlomkem označuje, zda se tlumivka nachází ve spotřebičovém (+) nebo zdrojovém (-) režimu.

Spřažený magnetický tok *vzduchové* cívky se v obecním případě dá vyjádřit pomocí celkové orientované plochy cívky S , uzavřené hraniční křivkou l , přes kterou prochází siločáry magnetické indukce B . V limitním případě můžeme napsat plošný integrál

$$\Psi = \oint_l \vec{B} \cdot d\vec{S}, \quad (1-3)$$

který vyjadřuje skalární součin. Celkový tok interaguje s plochou S .

Spřažený magnetický tok *feromagnetickým* jádrem vyjadřuje

$$\Psi \cong NB_{Fe}S_{Fe} = N\Phi, \quad (1-4)$$

kde při zanedbání rozptylového toku tekoucími vzdušnými cestami, velikost spřaženého toku cívky téměř nezávisí na způsobu navinutí vodiče kolem feromagnetického jádra. Proto je patrné, že feromagnetikum je namáháno magnetickým tokem Φ a nikoliv spřaženým tokem Ψ .

Dynamická definice indukčnosti je konstanta úměrnosti mezi indukovaným napětím a časovou změnou proudu v cívce

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}. \quad (1-5)$$

V lineárních obvodech platí přímá úměra mezi magnetickým tokem a proudem. Proto můžeme vyjádřit indukované napětí:

$$u(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = N \frac{d\Phi(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt}. \quad (1-6)$$

Z uvedených souvislostí v (1-6) odvodíme vlastní indukčnost cívky dle statické definice

$$L = \frac{\Psi}{I}. \quad (1-7)$$

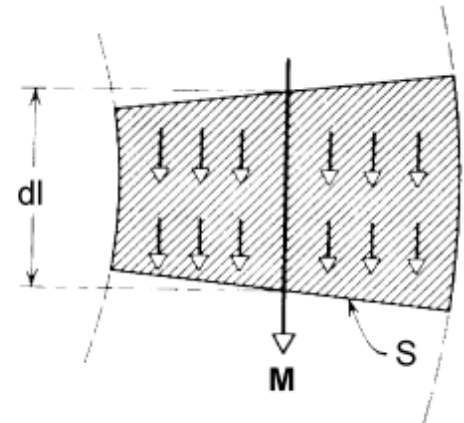
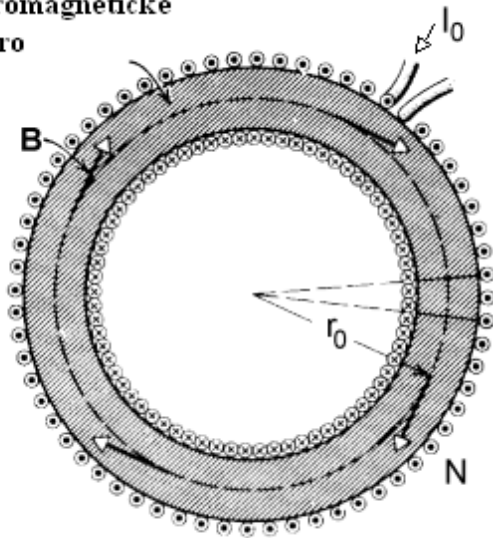
Pro znázornění magnetické indukce je nakreslena toroidní cívka na *Obr. 1-1*. Hodnota magnetické indukce je úměrná integrálu Ampérova zákona:

$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 (I + \oint_l \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l}). \quad (1-8)$$

Kde

- \mathbf{B} Vektor magnetické indukce.
- μ_0 Permeabilita vakua.
- $I = NI_0$ Proud obtékající toroidní jádro.
- \mathbf{M} Vektor magnetizace
- l Střední délka toroidu.

Feromagnetické
jádro



Obr. 1-1: Zobrazení magnetické indukce v toroidní cívce. [8]

Ampérův zákon z (1-8) upravíme na tvar

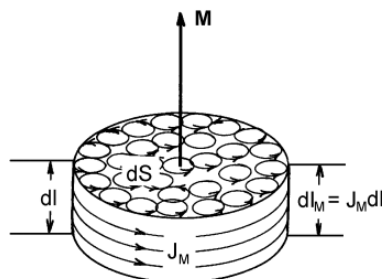
$$\oint_l \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \right) \cdot d\mathbf{l} = I. \quad (1-9)$$

Plošný integrál po uzavřené dráze magnetického vektoru se rovná proudu I v magnetickém prostředí a rovnici (1-9) upravíme na vztah

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}, \quad (1-10)$$

který vyjadřuje vektor intenzity magnetického pole \mathbf{H} .

Vektor magnetizace \mathbf{M} závisí na objemové koncentraci n magnetických dipólů s momentem \mathbf{m} ve feromagnetiku, tzv. zrnitost feromagnetika, jenž je vidět na Obr. 1-2. Pokud se materiál nenachází ve vnějším magnetickém poli a nevykazuje vlastní magnetický moment, magnetické dipóly jsou statisticky rozloženy rovnoměrně do všech směrů a jejich účinky se kompenzují v důsledku tepelného pohybu atomů feromagnetika. Při vložení do magnetického pole s indukcí \mathbf{B} se mají dipóly tendenci natočit podle účinků momentu $\mathbf{m} \times \mathbf{B}$ do směru vektoru magnetické indukce \mathbf{B} .



Obr. 1-2: Vektor magnetizace ve válci zmagnetizovaného materiálu. [8]

Můžeme tedy napsat vztah pro magnetizaci

$$M = \frac{dm}{d\tau} = \frac{J_M dldS}{dldS} = J_M, \quad [\text{Am}^{-1}], \quad (1-11)$$

kde

- dl Výška válečku.
- dS Průřez válečku.
- $d\tau$ Objem válečku.
- J_M Plošný proud neboli atomární cirkulační proud ve feromagnetiku.

Z Obr. 1-2 můžeme vyjádřit magnetickou indukci

$$B = \mu_0 M. \quad (1-12)$$

Permeabilita vakua μ_0 je fyzikální konstanta o hodnotě $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ a vyjadřuje měrnou magnetickou vodivost vakua. Absolutní permeabilitu μ určuje součin permeability vakua μ_0 a relativní permeability μ_r materiálu

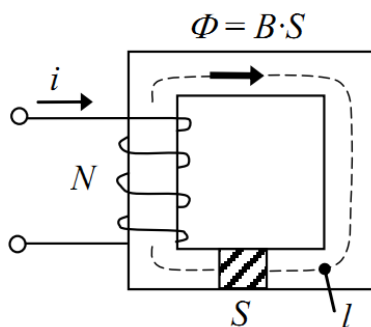
$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad [\text{Hm}^{-1}]. \quad (1-13)$$

Magnetická vodivost λ_m je v lineárním obvodu rovna absolutní permeabilitě μ , kterou můžeme vyjádřit z magnetické indukce B a intenzity magnetického H pole dle vztahu

$$\mu = \frac{B}{H}, \quad [\text{Hm}^{-1}]. \quad (1-14)$$

Dle Hopkynsonova zákona odvodíme z Obr. 1-3 následující vztahy:

$$\lambda_m = \frac{I_m}{U_m} = \frac{B S}{H l} = \mu \frac{S}{l}. \quad (1-15)$$



Obr. 1-3: Lineární diskretní magnetický obvod cívky. [2]

Indukčnost lineárního diskrétního magnetického obvodu je rovna počtu závitů N^2 podle

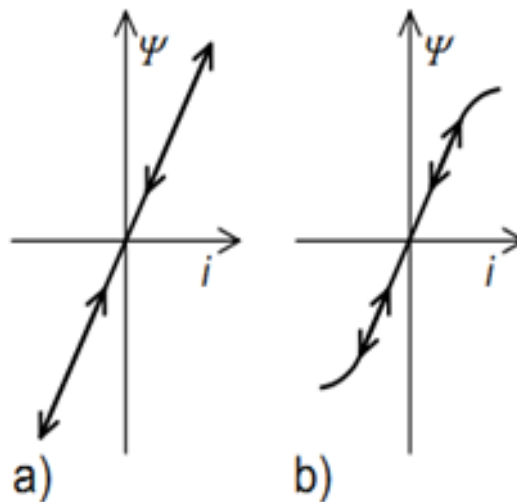
$$N^2 \lambda_m I = LI, \quad (1-15)$$

jelikož proudy na obou stranách rovnice se vyruší a magnetická vodivost je dána typem použitého feromagnetického jádra.

Pro návrh tlumivky v lineární oblasti feromagnetického materiálu použijeme následující rovnosti vztahů

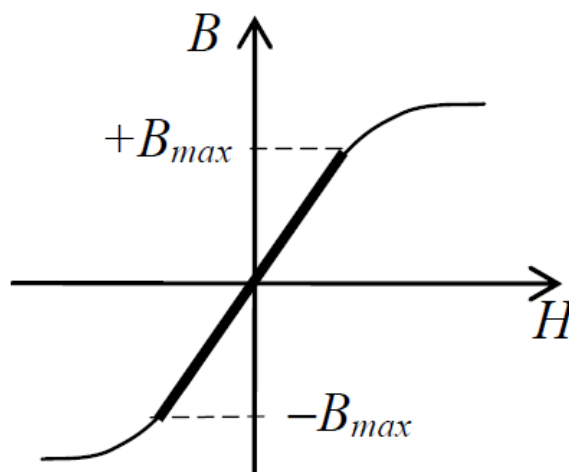
$$\Psi \cong N\Phi_{max} = LI_{max} = NB_{max}S_{Fe}. \quad (1-15)$$

Závislost proudu na toku ukazuje *Obr. 1-4* a určuje, zda je tlumivka lineární či nelineární. Pokud se snažíme navrhovat tlumivku s feromagnetickým obvodem v jeho lineární oblasti, jak ukazuje *Obr. 1-5*, je vidět přímá závislost mezi maximální indukcí B_{max} a maximálním proudem I_{max} ze vztahu (1-15).



Obr. 1-4: Magnetizační charakteristiky: [9]

- a) Lineární.
- b) Nelineární.



Obr. 1-5: Linearizovaný magnetický model. [2]

2 POŽADAVKY NA NÁVRH VÝKONOVÝCH TLUMIVEK

Jakou výkonovou tlumivku použijeme v elektrickém zařízení, závisí na více faktorech. Vychází se ze zadání pro návrh tlumivky a dle něj se vybírá z technických parametrů určitého typu výkonové tlumivky. Standardně jsou označovány tlumivky podle aplikace, ve které se v elektrickém zařízení nacházejí.

Podle [2] známe dva druhy výkonových tlumivek:

- Vzduchová výkonová tlumivka.
- Tlumivka s feromagnetickým obvodem a vzduchovou mezerou.

V práci jsou rozebrány postupy k návrhu pro tyto typy výkonových tlumivek:

- Vzduchová jednovrstvá válcová tlumivka. [3]
- Vzduchová kotoučová tlumivka. [2] a [3]
- Tlumivka s jádrem z EI $a \times a$. [2]
- Tlumivka s tyčovým jádrem a jednovrstvým vinutím.

Při návrhu tlumivky se vychází ze zadaných základních parametrů důležitých pro chod celé soustavy, ve které je výkonová tlumivka následně provozována. Jedná se o parametry:

- Požadovaná indukčnost L a reaktance X_L .
- Jmenovitý efektivní proud I_{ef} procházející cívkou.
- Tvar zvlnění k_z procházejícího proudu nebo velikost maximální hodnoty proudu I_{max} .
- Jakost Q .
- Jmenovité či provozní maximální napětí U_{max} .
- Maximální rozměry, hmotnost, objem.
- Ekonomičnost výroby.

3 VSTUPNÍ ÚDAJE PRO NÁVRH TLUMIVEK

V této kapitole budou rozebrány základní zadání pro návrh tlumivky. Velmi podrobně o nich pojednává skriptum [2] a výzkumná zpráva [3].

Všechny zadání pro návrh musí obsahovat informaci o frekvenčním rozsahu, na kterém bude tlumivka provozována. Podle velikosti provozní frekvence pracovního proudu tlumivkou se určí, jaký typ tlumivky je reálně použitelný.

3.1 Zadána indukčnost L , efektivní proud I_{ef}

Zde se musí proudová hustota volit dle zkušeností návrháře. Zpětnou kontrolou navržené tlumivky se pak ověří, zda byl zvolen dostatečný průřez vodiče vinutí dle zvolené proudové hustoty.

3.2 Zadána indukčnost L , efektivní proud I_{ef} , povrchové oteplení ΔT

Jelikož známe od výrobce izolace ve vinutí její maximální dovolené oteplení, lze proudovou hustotu spočítat. Tudiž se tak navrhne i neoptimálnější průřez vodiče vinutí. Návrhář musí mít alespoň minimální znalosti o tepelně-elektrických analogiích, jenž jsou podrobně popsány v [14].

3.3 Zadána indukčnost L a odpor vinutí R_{cu}

Důležité pro tlumivky s vysokou jakostí. Využití pro zařízení s požadavkem nejvyšší účinnosti či v LC filtrech basových reproduktorů.

3.4 Doplnující údaje pro návrh

Pro upřesnění, jaký typ výkonové tlumivky použít, zadání by mělo obsahovat informaci o druhu zařízení, ve kterém se bude tato navrhnutá tlumivka vyskytovat. Toto upřesnění se vztahuje, zda má být tlumivka optimalizována na co nejnižší cenu, velikost, hmotnost či objem vinutí.

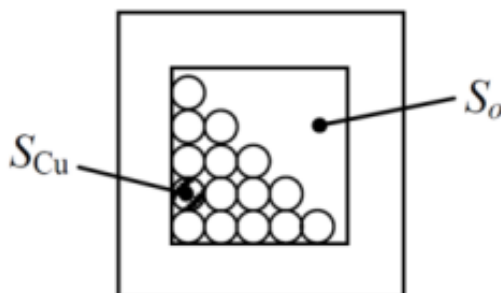
4 VINUTÍ

V této kapitole budou uvedeny veličiny a parametry důležité pro návrh vinutí tlumivek. Informace, které jsou uvedeny v následujících podkapitolách, byly čerpány z výzkumné zprávy [3].

4.1 Činitel plnění vinutí

Vyjadřuje v průřezu vinutí poměr celkové „čisté mědi“ S_{cu} v okně plochy vinutí okna S_o , kde čistou mědí se rozumí průřez všech závitů N vodiče dle vztahu

$$k_{p,Cu} = \frac{NS_{cu}}{S_o}, \quad [-; -, \text{mm}^2, \text{mm}^2]. \quad (4.1-1)$$



Obr. 4.1-1: Činitel plnění vinutí. [3]

Činitel plnění lze vyjádřit součinem velikostí činitele tvaru vodiče k_t , činitele izolace k_i , činitele přídavného neboli technologického $k_{př}$ a činitele k_g , pokud vinutí obsahuje vzduchové chladicí kanály:

$$k_{p,Cu} = k_t k_i k_{př} k_g. \quad (4.1-2)$$

4.1.1 Činitel tvaru

Jeho hodnota zahrnuje profil a uložení závitů vodiče ve vinutí. Pro upřesnění jsou v kapitole zobrazeny možné uložení nastíněné obrázkem a k němu odpovídající vztah a velikost k_t .

Činitel tvaru pro sousední vrstvy vinuty v opačném směru:

$$k_t = \frac{\pi}{4} = 0,78. \quad (4.1.1-1)$$



Obr. 4.1.1-1: Sousední vrstvy vinuty v opačném směru. [3]

Činitel tvaru pro sousední vrstvy vinuty ve stejném směru:

$$k_t = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,9 . \quad (4.1.1-2)$$



Obr. 4.1.1-2: Sousední vrstvy vinuty ve stejném směru. [3]

Činitel tvaru pro vodič obdélníkového průřezu:

$$k_t = 1 . \quad (4.1.1-3)$$



Obr. 4.1.1-3: Vodič obdélníkového průřezu. [3]

Činitel tvaru pro vinutí navinuto z pásoviny:

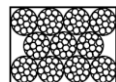
$$k_t = 1 . \quad (4.1.1-4)$$



Obr. 4.1.1-4: Vinutí navinuto z pásoviny. [3]

Činitel tvaru pro vinutí navinuté z vf. lan:

$$k_t = \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 = 0,617 . \quad (4.1.1-5)$$



Obr. 4.1.1-5: Vinutí navinuté z vf. lan. [3]

4.1.2 Činitel izolace

Pro vinutí navinuté z měděné či hliníkové pásoviny, kde mezizávitovou izolaci tvoří izolační vrstva izolantu, například izolační folie. Tento případ činitele izolace vyjadřuje vztah (4.1.2-2), kde t_{Cu} je tloušťka jádra vodiče a t_i je tloušťka izolace.

$$k_i = \frac{t_{Cu}}{t_{Cu} + t_i}, \quad [-; \text{mm}, \text{mm}] . \quad (4.1.2-1)$$

Pro vodiče kruhového průřezu platí

$$k_i = \frac{d_{Cu}^2}{d_{vodič}^2}, \quad [-; \text{mm}, \text{mm}] , \quad (4.1.2-2)$$

kde

- d_{Cu} Průměr jádra vodiče.
- $d_{vodič}$ Celkový průměr vodiče.

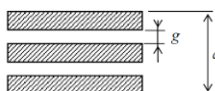
4.1.3 Činitel přídatný

Závisí na poměru tloušťky vodiče v závislosti na velikosti vinutí. Dále pak na počtu závitů a zručnosti pracovníka, co vinutí bude navíjet. Jeho určení jde odvodit ze zkušeností při výrobě vinutí, případně z příslušných norem. Značíme ho jako $k_{př}$.

4.1.4 Činitel chladících kanálů

Pokud je potřeba zlepšit přesun tepla zevnitř vinutí do okolního prostředí, je možno realizovat ve vinutí chladící kanálky. Na obrázku *Obr.2.1.4-1* je vidět, že velikost a prezentuje výšku vinutí, velikost g prezentuje rozměr chladícího kanálku a ve vztahu (4.1.4-1) n určuje počet sekcí rozdělení vinutí.

$$k_g = 1 - \frac{(n-1)g}{a}, \quad [-; -, \text{mm}, \text{mm}] . \quad (4.1.4-1)$$



Obr. 4.1.4-1: Znárodnění chladících kanálku ve vinutí. [3]

4.2 Skin-effect

Vlivem povrchového jevu, jenž se kvantitativně popisuje hloubkou vniku, dochází k vytlačování proudu ze středu vodiče směrem k povrchu. Tento jev popisuje rovnice (4.2-1), ve které δ označuje hloubku vniku, ρ je měrný odpor vodiče a μ je permeabilita vodiče. Rovnice platí jak pro kruhového vodiče, tak pro vodiče z izolovaného plechu.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} . \quad (4.2-1)$$

Jak je ze vztahu (4.2-1) patrné, hloubka vniku je závislá na kmitočtu a s rostoucím kmitočtem hloubka vniku klesá. V literatuře [1] je odvozen postup využívající teorie o hloubce vniku na určení použitelné tloušťky vodiče ze zadané frekvence. Výsledná odvozená rovnice má tvar:

$$d_{Cu} \leq \sqrt{\frac{4\rho}{\pi f \mu_0 \mu_{rCu}}} , \quad [\text{mm}; \Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}, -, \text{Hz}, \text{Hm}^{-1}, \text{Hm}^{-1}] . \quad (4.2-2)$$

4.3 Oteplení vinutí

Velikost ztrát ve vinutí závisí na možnosti vyzářit ztrátové teplo do okolí. Ztrátové teplo vytváří výkon P_{Cu} vznikající na odporu proudovodné dráhy cívky. Oteplení vinutí závisí na Joulových ztrátách

$$P_{Cu} = R_{Cu} I_{ef}^2 , \quad [\text{W}; \Omega, \text{A}] . \quad (4.3-1)$$

Vinutí je složeno z izolovaných vodičů, kde použitá izolace má přesně definovanou maximální provozní teplotu. Pokud by došlo k porušení izolace ve vinutí z důvodu tepelného přetěžování izolace vinutí, následoval by mezizávitový zkrat a snížení indukčnosti tlumivky.

Pokud známe maximální dovolenou provozní teplotu T použité izolace ve vinutí a teplotu okolí T_0 při provozu zařízení, vyjádříme dovolené oteplení

$$\Delta T = T - T_0 . \quad (4.3-2)$$

Pro návrh tlumivky se T_0 volí jako nejhorší případ dle příslušné normy pro konkrétní elektrické zařízení. V průmyslových zařízeních se stanovuje obvykle T_0 na 40°C. Pro návrh dle zvoleného maximálního oteplení vinutí je potřeba stanovit činitel přestupu tepla do okolí a teplotní závislost měrného odporu vodiče vinutí. Na těchto veličinách pak závisí stanovená hodnota proudové hustoty ve vinutí, při které dojde k požadovanému oteplení vinutí.

4.3.1 Činitel přestupu tepla do okolí

Přestup tepla do okolí se skládá ze složky vodivé α_v , jenž je tvořena mezní Newtonovou vrstvou obklopující těleso a složky zářivé α_z , jenž popisuje Stefan-Boltzmannův zákon. Celkový činitel přestupu tepla do okolí vyjadřuje vztah (4.3.1-1).

$$\alpha = [5 + 0,04(T - T_0) + 1,2v] + \frac{S_{vz}}{S_v} A \sigma \frac{T^4 - T_0^4}{T - T_0}. \quad (4.3.1-1)$$

Kde

- T Počáteční teplota, v průmyslových aplikacích je normou zadáno 313,15K.
- T_0 Maximální dovolená teplota izolace v kelvinech.
- v Rychlost nucené ventilace [m/s].
- $\frac{S_{vz}}{S_v}$ Poměr plochy vyzařovací ku celkové ploše vinutí.
- A Absorpční konstanta.
- σ Stefanova-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/K}^4 \text{ m}^2$.

4.3.2 Teplotní závislost měrného odporu vodiče

Měrný odpor jádra vodiče se mění v závislosti na teplotě. Pro jádra vodiče vinutí se nejčastěji používají tyto materiály

- Elektrotechnická měď *E-Cu*: $\rho_{Cu 20} = 1,78 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$.
- Elektrotechnický hliník *E-Al*: $\rho_{Al 20} = 2,99 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$.

Abychom určily měrný odpor jádra vodiče vinutí pro požadované oteplení, musíme stanovit teplotu

$$\vartheta = T + \Delta T + \Delta T_{ts}. \quad (4.3.2-1)$$

Kde

- T Počáteční teplota, v průmyslových aplikacích je normou zadáno 313,15K.
- ΔT Oteplení vinutí dle rovnice (4.3-2).
- ΔT_{ts} Teplotní spád ve vinutí, pohybuje se v rozmezí 5K až 10K.

Pro vyjádření měrného odporu *měděného vodiče* pro požadované oteplení použijeme

$$\rho_{Cu\vartheta} = \left(1 + \frac{\vartheta - 20^\circ\text{C}}{234,5 + 20^\circ\text{C}}\right) \rho_{Cu 20}. \quad (4.3.2-2)$$

Pro vyjádření měrného odporu *hliníkového vodiče* pro požadované oteplení použijeme

$$\rho_{Al\vartheta} = \left(1 + \frac{\vartheta - 20^\circ\text{C}}{244,5 + 20^\circ\text{C}}\right) \rho_{Al 20}. \quad (4.3.2-3)$$

4.3.3 Zatěžovací činitel

Jedná se o poměr efektivní hodnoty proudu I_{ef} v závislosti na maximálním proudu I_{max} podle vztahu

$$k_z = \frac{I_{ef}}{I_{max}}. \quad (4.3.3-1)$$

Na efektivní hodnotě závisí oteplení vinutí. Podrobně se k této problematice vyjadřuje [1].

4.3.4 Tepelný výkon vinutí

Z definice proudové hustoty víme, že závislost tepelného výkonu P_v , jenž nám reprezentují Joulovi ztráty dle vztahu (4.3-1) jsou přímo úměrné velikosti objemu vinutí V_v . To znamená, pokud použijeme na dvě různá vinutí stejný vodič a při vinutí dodržíme stejný činitel plnění $k_{p,Cu}$, tak při nárůstu objemu vinutí V_v stejně vzrostou tepelné ztráty vinutí P_v .

4.4 Proudová hustota

Vyjadřuje velikost proudu procházející průřezem vodiče vinutí

$$\sigma = \frac{I_{Cu}}{S_{Cu}}. \quad (4.4-1)$$

Volí se podle zkušeností návrháře nebo podle zvoleného oteplení vinutí lze dopočítat požadovanou proudovou hustotu zpětně. Například pokud bude udržována konstantní proudová hustota při návrhu vinutí tlumivky, pak bude konstantní i objemová hustota tepelného výkonu. Zvětšíme-li rozměry vinutí k -krát, pak objem V_v a tepelný výkon P_v se zvětší k^3 -krát, ale chladicí povrch vinutí S_v se zvětší pouze k^2 -krát. Proto je nutno u většího vinutí snižovat proudovou hustotu.

4.5 Parazitní kapacita

Vznik parazitní kapacity ve vinutí je dán sériovou kombinací mezizávitových kapacit (4.5-2). Ty bohužel nejdou fyzicky změřit. Změřit můžeme až celkovou parazitní kapacitu vinutí a to například úpravou Thomsonova vztahu vyjádříme parazitní kapacitu

$$C_{p,měř} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L_{měř}}, \quad [F; Hz, H]. \quad (4.5-1)$$

Pokud se jedná o cívku s vinutím jednovrstvým či namotaným z pásoviny, můžeme vypočítat parazitní kapacitu z návrhu cívky. Předpokládáme, že parazitní kapacita C_p je tvořena sériovou kombinací mezizávitových kapacit

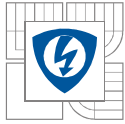
$$C_z = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{t_i}, \quad [F; Fm^{-1}, Fm^{-1}, m^2, m]. \quad (4.5-2)$$

Kde

- S Vyjadřuje plochu styku přiléhajících dvou závitů.
- t_i Tloušťka izolace.
- ε_r Permittivita impregnační látky či izolace.

Mezizávitovou kapacitu podělíme počtem závitů a dostaneme výraz pro vypočtenou parazitní kapacitu

$$C_p = \frac{C_z}{N}. \quad (4.5-3)$$



4.5.1 Mezizávitová kapacita

Pro cívku s vinutím jednovrstvým či namotaným z pásoviny se mezizávitová kapacita určí dle vztahu

$$C_z = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S_{z,styk}}{l_i}, \quad [\text{F}; -, -, \text{m}^2, \text{m}] . \quad (4.5.1-1)$$

Kde

- $S_{z,styk}$ Plocha styku k sobě přilehající závitů.
- l_i Tloušťka izolace mezi závitů.
- ε_0 Permittivita vakua $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$.
- ε_r Permittivita relativní, která závisí na impregnaci vinutí a použité izolaci.

4.5.2 Mezivrstevová kapacita

U vzduchových cívek s vícevrstevným vinutím se nedá určit velikost mezizávitových kapacit. Z činitele plnění odvodíme počet vrstev vinutí a použijeme

$$C_{vr} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S_{vr}}{l_i}, \quad [\text{F}; -, -, \text{m}^2, \text{m}] . \quad (4.5.2-1)$$

Kde

- S_{vr} Plocha vrstvy.
- l_i Průměrná tloušťka izolace mezi dvěma sousedními vrstvami.
- ε_0 Permittivita vakua.
- ε_r Permittivita relativní.

4.5.3 Rezonanční kmitočet

Zjištění rezonančního kmitočtu vychází z vyjádření f_0 z Thomsonova vztahu:

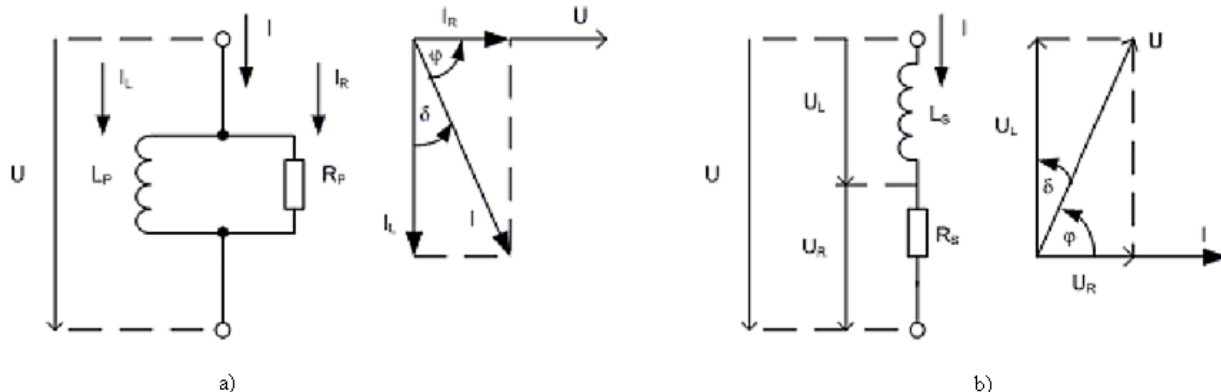
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m \varepsilon_r C_p}}, \quad [\text{Hz}; \text{H}, \text{F}] . \quad (4.5.3-1)$$

Při měření je podmínkou změření indukčnosti na nízkém kmitočtu, protože musíme dodržet, aby reaktance ωC_p byla oproti reaktanci ωL_s zanedbatelná. Při rezonančním kmitočtu je impedance cívky nejmenší a prakticky dosahuje hodnoty odporu vinutí. Je to dáno tím, že indukčnice a kapacitance se při rezonančním kmitočtu navzájem vynuší. Nastavováním frekvence a odečítáním velikosti impedance nalezneme rezonanční kmitočet.

Znalost tohoto kmitočtu je důležitá, protože nad tímto kmitočtem převládá kapacitní složka impedance vinutí tlumivky.

4.6 Jakost Q

Jakosti cívky je popsána ve skriptu [10]. U skutečné cívky vlivem ztrát po připojení na harmonický střídavý zdroj proudu se vytvoří fázový posuv φ mezi vektory napětí a proudu zmenšený o ztrátový úhel cívky δ dle Obr. 4.6-1.



Obr. 4.6-1: Náhradní obvod cívky [10]

- Paralelní ztrátový odpor.
- Sériový ztrátový odpor.

Tangens fázového posuvu φ je převrácenou hodnotou ztrátového činitele a představuje fyzikální veličinu nazývanou činitel jakosti cívky Q . Lze vyjádřit z fázorových diagramů uvedených na Obr. 4.6-1, jako poměr indukční reaktance cívky vůči jejímu ztrátovému odporu:

$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s}, \quad [-; \text{Hz}, \text{H}, \Omega]. \quad (4.6-1)$$

$$Q = \frac{R_p}{\omega L_p}, \quad [-; \text{Hz}, \Omega, \text{H}]. \quad (4.6-2)$$

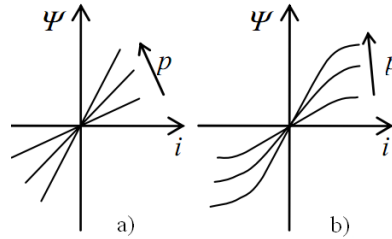
5 FEROMAGNETICKÝ OBVOD

Tlumivky s feromagnetickým obvodem a vzduchovou mezerou oproti vzduchovým tlumivkám umožňují dosáhnout při zadaných stejných parametrech použití menší velikosti vinutí. V následujících podkapitolách jsou uvedené informace čerpány ze skriptu [2].

5.1 Magnetický obvod

Volba feromagnetika závisí na frekvenci vinutím procházejícího proudu tlumivkou. Z topologického hlediska se dělí feromagnetický obvod na spojitý nebo diskrétní. Feromagnetické jádra s velkou měrnou vodivostí se řadí mezi diskrétní magnetické obvody. Proto magnetický tok prochází prostorově ohraničeným prostorem daný geometrií jádra a veškerou elektromagnetickou energii soustřeďuje ve vzduchové mezeře.

Magnetické obvody se dělí na lineární a nelineární, které jsou funkcí závislosti spřaženého toku na proudu $\Psi = \Psi(i)$ podle Obr. 1-4. Nezávisle na předešlém třídění lze magnetické obvody dělit na obyčejné a parametrické podle Obr. 5.1-1. Parametrický obvod je takový obvod, který je krom $\Psi = \Psi(i)$ také závislý i na dalším fyzikálním parametru p prezentující např. vliv délky vzduchové mezery, teploty atd.



Obr. 5.1-1: Magnetizační charakteristiky [2]

- a) Lineární parametrická.
- b) Nelineární parametrická.

Lineární magnetický obvod je popisován v kapitole 1. V technické praxi je možno uvažovat feromagnetický obvod za *přibližně* lineární, pohybuje-li se pracovní bod pouze v lineární oblasti magnetizační charakteristiky znázorněné na Obr. 1-5. Obrázek zobrazuje *relativní normovanou charakteristiku* $B = B(H)$. Je výhodnější než *absolutní magnetizační charakteristika* $\Psi = \Psi(i)$, jelikož není závislá na geometrických rozměrech magnetického obvodu a proto umožňuje vzájemně porovnávat vlastnosti různých materiálů.

U nelineárních magnetických obvodů se vyjadřuje magnetizační charakteristika složenou dynamickou funkcí zapsanou ve tvaru

$$\Psi(t) = \Psi[i(t)] , \quad (5.1-1)$$

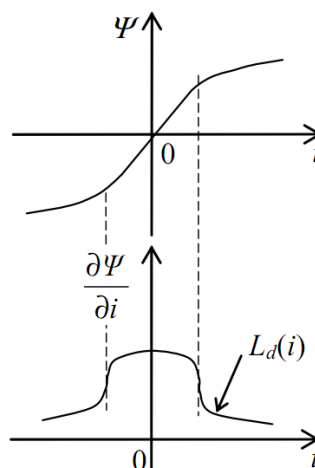
kde hranatá závorka je vyznačena vnější statickou funkcí proudu a kulatá vyznačuje vnitřní funkci času. Pro výpočet indukovaného napětí se vyjde ze vztahu (1-2), do kterého je dosazeno vyjádření proudu $i(t)$ ze vztahu (5.1-1):

$$u(t) = L_d[i] \frac{di(t)}{dt} . \quad (5.1-2)$$

Diferenciální indukčnost L_d je směrnice tečny v magnetizační charakteristice uvedené na Obr. 5.1-2 dle:

$$L_d[i] = \frac{\partial \Psi}{\partial i} . \quad (5.1-3)$$

Proto má L_d hodnotu *přibližně* konstantní v nepřesycené oblasti a při přesycení klesá hodnota indukčnosti až na hodnotu vzduchové cívky.



Obr. 5.1-2: Charakteristiky v nelineárním magnetickém obvodu. [2]

5.2 Feromagnetické materiály

Vyznačují se nelinearitou a hysterezí magnetizační charakteristiky $B = B(H)$ a velkou absolutní permeabilitou vyjádřenou vztahem (1-13). Ta je dána relativní permeabilitou feromagnetického materiálu $\mu_{r,Fe}$, která je typicky o tři řády větší oproti permeabilitě vakua μ_0 . Měrnou magnetickou vodivost materiál ztrácí po překročení tzv. Curierovy teploty. Dělíme je na materiály:

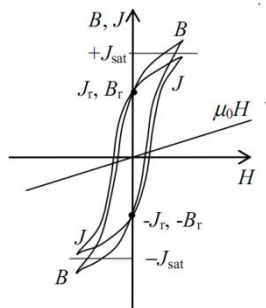
- Magneticky měkké, které mají úzkou hysterezní smyčku uvedenou na *Obr. 5.2-1* s malou koercitivní intenzitou H_c o hodnotě do 10^4 Am^{-1} a malou remanentní indukci B_r menší než 0,1T.
- Magneticky tvrdé, které mají širokou hysterezní smyčku s velkou koercitivní intenzitou H_c remanentní indukci B_r .

Pro stavbu magnetických obvodu pro tlumivky jsou vhodné magneticky měkké materiály. Pro aplikace ve výkonové elektrotechnice pro nízké frekvence se používá křemíková ocel o normovaných tloušťkách.

Pokud potřebujeme provozovat tlumivku na vyšší frekvence, než 500Hz, tak se užívá měkkých feritů. Jsou to látky feromagnetické s velkým měrným odporem, čímž sníží ztráty vířivými proudy na nulu. Nejčastější feritový materiál ve výkonových tlumivkách je manganato-zinečnatý.

Feromagnetické materiály jsou stále vyvíjeny, bohužel nevýhodou nově vyvinutých feromagnetických materiálů jsou jejich vysoké pořizovací náklady.

Pro návrh tlumivky je důležité stanovení indukce ve feromagnetickém jádře B_{max} , jenž návrhář volí s ohledem na hysterezní ztráty, jelikož plocha hysterezní smyčky roste, čímž výše leží bod B_{max} na $B = B(H)$ charakteristice, kterou ukazuje *Obr. 5.2-1*.



Obr. 5.2-1: Hysterezní smyčka magneticky měkkého materiálu. [2]

Závislost $B(H)$ lze určit přímým měřením, jak zobrazuje *Obr. 5.2-1*. Skládá se z magnetizace samotného vakua v meziatomárním prostoru feromagnetika a z magnetické polarizace J , která popisuje chování samotných atomů obsažených v materiálu, bez spolupůsobení vakua. Můžeme tedy vyjádřit magnetické polarizaci uvedenou taktéž na *Obr. 5.2-1*:

$$J(H) = B(H) - \mu_0 H, \quad [\text{T}; \text{T}, \text{Hm}^{-1}, \text{Am}^{-1}]. \quad (5.2-1)$$

U magneticky měkkých materiálů rozdíl tvaru hysterezních smyček $B(H)$ a $J(H)$ je nepatrný a tudíž splývají i hodnoty B_r a J_r .

5.2.1 Ztráty vířivými proudy

Vířivý proud je elektrický proud vznikající na plošných a objemových vodičích, když se v jejich okolí mění magnetický indukční tok. Indukované proudy mají v takových případech charakter proudových smyček. Pokud je feromagnetický materiály elektricky vodivý, budou v něm takto vznikat vířivé proudy, které na odporu onoho feromagnetika vytváří ztrátový výkon.

To je například důvod, proč se magnetická jádra skládají z pokud možno co nejtenčích plechů, které jsou od sebe izolovány. Ocel je dotována křemíkem na zvýšení měrného elektrického odporu. Ztráty vířivými proudy do 1kHz rostou s druhou mocninou kmitočtu. Navíc z praktického hlediska použití křemíkových plechů není možné nad 500hz kvůli hysterezním ztrátám v železe. Ferity jsou elektricky nevodivé, proto v nich nevznikají vířivé proudy.

5.2.1 Hysterezní ztráty

Vyznačuje energii přeměněnou na teplo při jednom oběhu hysterezní smyčky a tento ztrátový výkon je tedy roven její ploše. Pokud vezmeme *normovanou charakteristiku* $B = B(H)$ feromagnetika, tak má plocha S_H její hysterezní smyčky význam měrné ztrátové energie vztažené na objem 1m^3 . Ztrátový výkon hysterezních ztrát roste na frekvenci dle

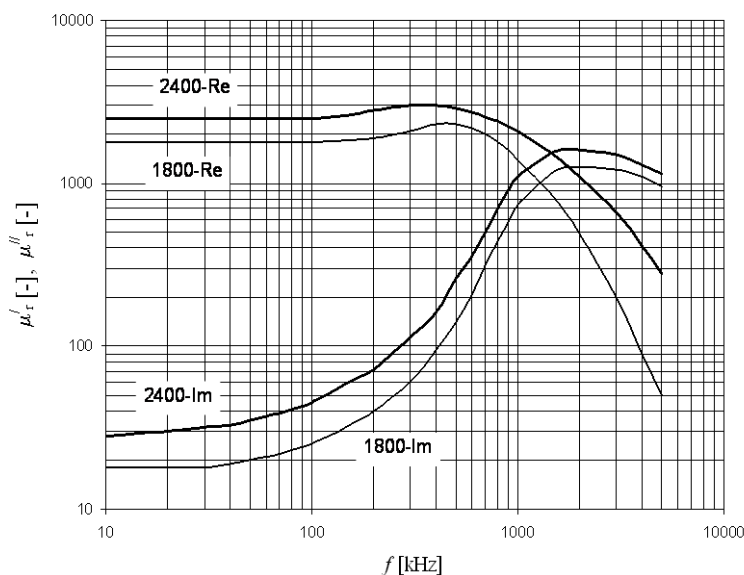
$$P_H = W_H f = f S_H V_{Fe}, \quad [\text{W}; \text{Hz}, \text{J/m}^3, \text{m}^3]. \quad (5.2.1-1)$$

5.3 Komplexní permeabilita

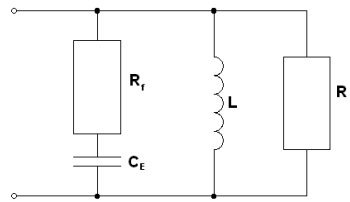
Závisí na velikosti hysterezních ztrát ve feromagnetiku. Slouží k posouzení ztrát feritových materiálů na vysokých kmitočtech. Relativní komplexní permeabilita je dána vztahem

$$\hat{\mu}_r(\omega) = \mu_r'(\omega) - j\mu_r''(\omega), \quad (5.3-1)$$

kde *reálná* část značí skutečnou permeabilitu materiálu a nežádoucí *imaginární část* značí hysterezní ztráty.



Obr. 5.3-1: Změřená komplexní permeabilita pro manganato-zinečnaté ferity s permeabilitou $\mu_{r,rf} \approx 1800$ a 2400 . [2]



Obr. 5.3-2: Náhradní zapojení cívky. [2]

Kde:

- R_h Reprezentující *hysterezní ztráty*.
- C_E Ekvivalentní kapacita je obrazem momentu setrvačnosti mikroskopických objektů „otočně uložených“ v krystalové mřížce materiálu. Tvoří s indukčností L rezonanční obvod.
- R_f Tlumící odpor.

5.3.1 Model komplexní permeability – postup vypracování

- 1) Naměřit průřez a délku feritu. LRC metrem naměřit paralelní indukčnosti L_p a paralelní odpor R_p na nízkých kmitočtech cca 1kHz. Naměřenou indukčnost dosadit za L do vzorce

$$\mu'_{r,nf} \cong \mu_{r,nf} \cong \frac{Ll}{N^2 \mu_0 S_{Fe}} \quad (5.3.1-1)$$

- 2) Určit rezonanční kmitočet. Je možno ho stanovit měřením L_p a R_p . Nalezení rezonančního kmitočtu se provede tak, že při rezonanci vystoupá hodnota naměřené paralelní indukčnosti L_p na vysokou hodnotu a po překročení rezonančního kmitočtu skokově přejde L_p na záporné hodnoty. Naměřený kmitočet označit jako ω_0 .
- 3) Do rovnice 2.1-2 dosadit hodnotu R_p za R_h naměřenou při nízkém kmitočtu, jelikož se neuplatní tlumící odpor R_f přes kapacitu C_e .

$$R_{h0} = R_h \frac{\omega}{\omega_0} \quad (5.3.1-2)$$

- 4) Dosadit do rovnice

$$\mu'_{r,nf} = \mu_{r,nf} \frac{\omega_0 L / R_{h0}}{1 + (\omega_0 L / R_{h0})^2} \quad (5.3.1-3)$$

- 5) Určit konstantu α dle vzorce

$$\alpha = \frac{\mu'_{r,nf}}{\mu_{r,nf}} \quad (5.3.1-4)$$

- 6) Určit ekvivalentní kapacitu C_E dle vzorce

$$C_E = \frac{1}{\omega_0^2 L} \quad (5.3.1-5)$$

- 7) Na rezonančním kmitočtu naměřit paralelní odpor R_{p0} , který musí mít velikost řádově menší než R_{h0} . Proto tuto naměřenou lze považovat za hodnotu tlumícího odporu R_f dle vzorce

$$R_f \cong R_{p0} \quad (5.3.1-6)$$

- 8) Určit konstantu β dle vzorce

$$\beta = \frac{R_f}{R_{h0}} \quad (5.3.1-7)$$

9) Provést kontrolu konstant

$$R_f C_E = \frac{\alpha \beta}{\omega_0} . \quad (5.3.1-8)$$

10) Dosadit a vynést do grafu reálnou a imaginární permeabilitou závislou na frekvenci, vyjádřenou z rovnic (5.3.1-9a) a (5.3.1-9b) v normovaném tvaru.

$$\frac{\mu_r'(\omega)}{\mu_{r,nf}'} = \frac{1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2}(\alpha^2 \beta^2 - 1)}{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \beta - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{1 + \frac{\omega}{\omega_0} \alpha \beta}{\omega_0}\right)^2} . \quad (5.3.1-9a)$$

$$\frac{\mu_r''(\omega)}{\mu_{r,nf}''} = - \frac{\frac{1}{\alpha} + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \alpha \beta^2 + \frac{\omega^3}{\omega_0^3} \alpha \beta}{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \beta - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{1 + \frac{\omega}{\omega_0} \alpha \beta}{\omega_0}\right)^2} . \quad (5.3.1-2b)$$

5.3.2 Naměřené hodnoty komplexní permeability

K měření bylo použito toroidní feritové jádro, ze kterého byla realizovaná tlumivka o parametrech uvedených v *Tab. 5.3.2-1*. Stejně toroidní feritové jádro se použilo k realizování a analyzování tlumivky s tyčovým jádrem z kapitoly 9.

Parametry tlumivky		
<i>a</i>	15	mm
<i>b</i>	22	mm
<i>d</i>	65	mm
<i>N</i>	6	

Tab. 5.3.2-1: Parametry tlumivky pro měření komplexní permeability.

Při 1kHz byl naměřen odpor $R_p = R_h = 42,8\Omega$. Rezonanční kmitočet byl stanoven na hodnotě $f_0 = 890\text{kHz}$. Odpor při rezonančním kmitočtu měl hodnotu $R_{p0} = R_f = 1,36\text{k}\Omega$. Mezivýpočty důležité pro určení modelu komplexní permeability:

$$\mu_{r,nf}' = 1749,3372.$$

$$\omega_0 = 5592034,9\text{s}^{-1}.$$

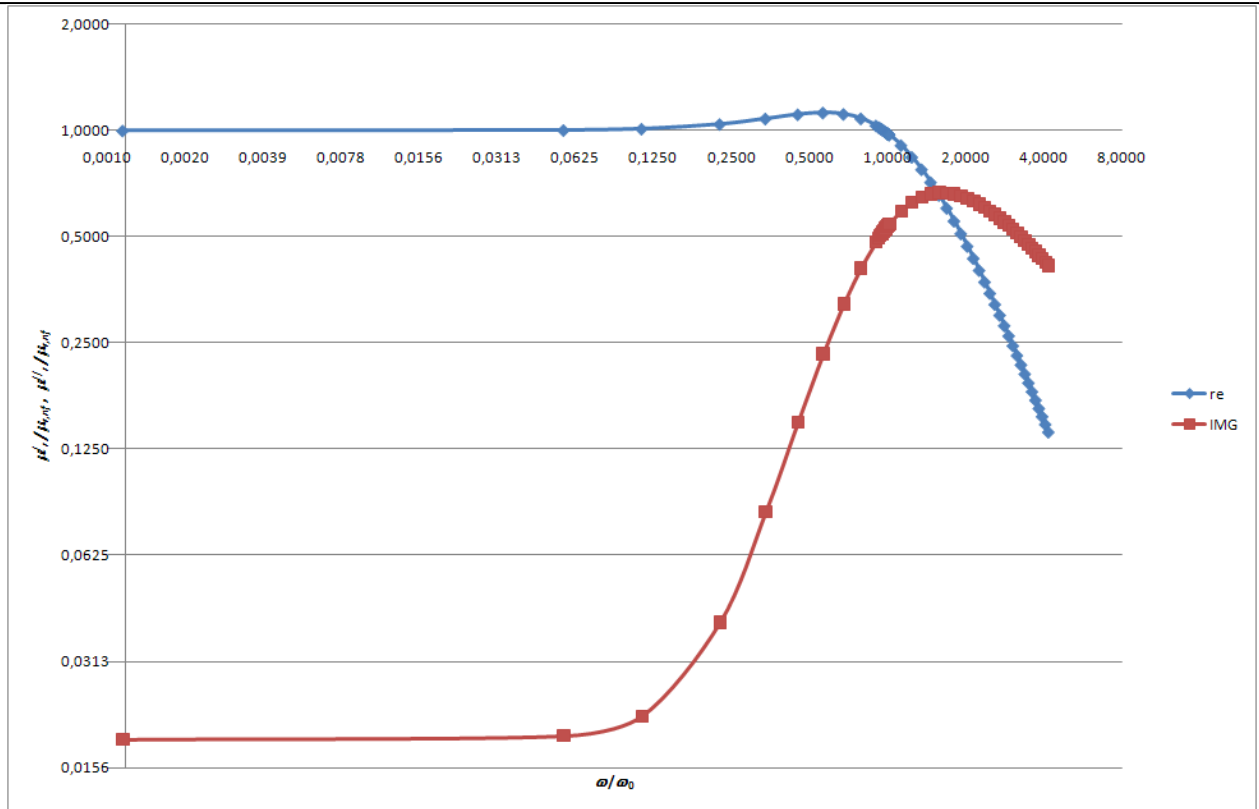
$$R_{h0} = 38092\Omega.$$

$$\mu_{r,nf}'' = 32,831684.$$

$$\alpha = 53,281982.$$

$$C_e = 2,5 \cdot 10^{-10}\text{F}.$$

$$\beta = 0,035703.$$



Obr. 5.3.2-1: Model komplexní permeability.

5.4 Činitel plnění železa ve feromagnetickém jádře

Jedná se o poměrové číslo podle vztahu

$$k_{p,Fe} = \frac{S_{Fe}}{S_j}, \quad (5.1.3-1)$$

kde

- $k_{p,Fe}$ Vyjadřuje velikost plochy čistého feromagnetika.
- S_{Fe} Průřez feromagnetika.
- S_j Celkový průřez jádra tlumivky.

Pokud se jedná o jádro s odstupňovaným průřezem, činitel plnění jádra můžeme vyjádřit

$$k_{p,Fe} = k_{p,plechu} k_{pt}. \quad (5.1.3-2)$$

Pro stanovení $k_{p,plech}$ u ocelových plechů použijeme

$$k_{p,plech} = \frac{t_{plech}}{t_{plech} + t_p}, \quad (5.1.3-3)$$

kde

- t_{plech} Tloušťka plechu.
- t_p Šířka parazitní mezery.

Ideální kruhový sloupek má hodnotu $k_{pt} = 1$. Od ideálního kruhového sloupku se odvíjí hodnota k_{pt} na počtu odstupňování dle Tab.3.3-1.

Odstupňování	k_{pt}
2x	0,7869
3x	0,851
4x	0,8855
5x	0,9091

Tab. 5.1.3-1: Tabulka k_{pt} pro odstupňované průřezy sloupků.

5.5 Vzduchová mezera

Magnetická vodivost λ_m magnetického obvodu tlumivky je tvořena sériovým spojením magnetické vodivosti feromagnetika λ_{mFe} a magnetické vodivosti vzduchové mezery λ_{mv} . Vzduchová mezera při realizaci tlumivky s feromagnetickým obvodem umožňuje zredukovat objem použitého feromagnetika na minimum. Její správné určení je základem správného návrhu tlumivky.

Pro návrh použijeme vzorce (5.1.4-1) nebo (5.1.4-2).

$$l_v = \frac{N\mu_0 I_{max}}{B_{max}} - \frac{l_{Fe}}{\mu_{r,Fe}} \quad (5.1.4-1)$$

$$l_v = \frac{L\mu_0 I_{max}^2}{B_{max}^2 S_{Fe}} - \frac{l_{Fe}}{\mu_{r,Fe}} \quad (5.1.4-2)$$

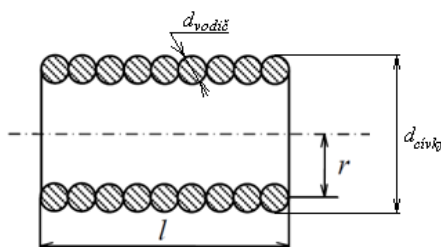
6 JEDNOVRSTVÁ VÁLCOVÁ VZDUCHOVÁ CÍVKA - OPTIMÁLNÍ NÁVRH

Tlumivka je tvořena jednovrstvým vinitím a pro návrh se využívá poloempirického vztahu publikovaného Wheelerem [1] v roce 1928, jenž má tvar

$$L = \frac{0,41N^2 r^2}{9r + 10l}, \quad [\mu\text{H}; \text{cm}, \text{cm}] \quad (6-1)$$

Vztah se opírá o topologické rozložení rozměrů z Obr. 6-1. Pro $l \geq r$ dosahuje rovnice přesnosti do $\pm 1\%$. Tyto údaje byly převzaty z výzkumné zprávy [3].

Optimalizace návrhu má za cíl nalézt takovou velikost vinití, při kterém bude nejlépe předávat ztrátové teplo do okolí.



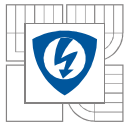
Obr. 6-1: Řez jednovrstvou vzduchovou cívkou. [3]

Pro dosažení optimální velikosti vinití, zavedeme předpoklad

$$d_{cívky} \cong l \quad (6-2)$$

Délku cívky l tvoří celkový průměr vodiče $d_{vodič}$ a počet závitů

$$l = N d_{vodič} \quad (6-3)$$



Určení *celkového* průměru $d_{vodič}$ vychází ze zadané proudové hustoty. Ta je vyjádřena vztahem (4.4-1) ze kterého se vyjádří průřez mědi S_{Cu} . Dále se hledá použitelný druh vodiče. Například se může použít vodič z [4] s měděným lanovým jádrem pro snadné realizování vinutí tlumivky. Podle katalogových údajů výrobce, nalezneme *celkový* průměr $d_{vodič}$.

Odvození rozměrů tlumivky v závislosti na počtu závitů N a průměru $d_{vodič}$ se použije vztah

$$Nd_{vodič} \cong 2r + d_{vodič}. \quad (6-4)$$

Z (6.1-2c) se vyjádří poloměr vinutí r :

$$r = \frac{d_v - Nd_v}{2}. \quad (6-5)$$

Vyjádřením počtu závitů N ze vztahu (6-1) a dosazením předpokladů uvedených v (6-2c) vyloučíme vzorec

$$N = \sqrt{\frac{L(9r + 10(2r + d_{vodič}))}{0,41r^2}}, \quad [-; \mu\text{H}, \text{cm}, \text{cm}]. \quad (6-6)$$

Určení počtu závitů z (6-6) stále obsahuje odhadnutí poloměru vinutí r . Pokud se dosadí za r rovnice (6-5), tak algebraické řešení takové úpravy vede ke kvartické rovnici ($n = 4$), jenž je velmi obtížně řešitelná. O obecném řešení takové rovnice se vyjadřuje [5].

Jednodušší způsob řešení spočívá v dosazování různých r do (6-6) a okamžitou kontrolou výsledné indukčnosti dosazením voleného r a nalezeného N do (6-1). Pro tuto možnost je výhodné vzorce napsat do tabulkového procesoru, například v programu MS Excel [11] či OpenOffice.org Calc [12]. Pokud vyjde N mezi celými čísly, lze zpětně zkorrigovat velikost r dosazováním různých počtu závitů N v celých číslech do vztahu

$$r = \frac{9L + \sqrt{((9L)^2 + 16,4N^3 L d_{vodič})}}{0,82N^2}, \quad [\text{cm}; \mu\text{H}, \text{cm}, -]. \quad (6-7)$$

Dosáhnutím předpokladu (6-3) na optimální velikost vinutí, nalezené r a N z (6-7) je třeba dosadit do vztahu (6-4). Vztah (6-7) vznikl vyjádřením r ze základního vztahu (6-1). Pro délku použitého vodiče l_{Cu} ve vinutí se použije vztah

$$l_{Cu} = 2\pi Nr. \quad (6-8)$$

Objem mědi ve vinutí V_{Cu} vyjadřuje

$$V_{Cu} = S_{Cu} l_{Cu}. \quad (6-9)$$

Objem vinutí V_v vyjadřuje

$$V_v = \frac{\pi((2r + d_{vodič})^2 - (2r - d_{vodič})^2)}{4} l. \quad (6-10)$$

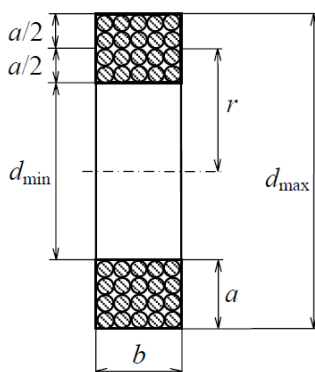
Přesnost výpočtů bude záviset i na činiteli plnění vinutí, jak je patrné z *Obr. 6-1*, čímž se podaří dosáhnout většího činitele plnění $k_{p,Cu}$ a tedy přiblížení se jednotlivých jader vodiče závitů k sobě, tím se bude zmenšovat odchylka vypočtených parametrů tlumivky od reality. Při použití lakovaných vodičů obdélníkového průřezu je možno dosáhnout největší přesnosti navržených hodnot.

7 KOTOUČOVÁ VZDUCHOVÁ CÍVKA - OPTIMÁLNÍ NÁVRH

V této kapitole jsou uvedené informace převzaty ze skript [2] a výzkumné zprávy [3]. Rozměry kotoučové cívky jsou plně definovány třemi údaji: tloušťka vinutí a , šířka vinutí b , střední poloměr r . Pozice rozměrů jsou zakresleny na *Obr. 7-1*. Optimálním návrhem se rozumí nalezení takového poměru $a : b : r$, aby navržená cívka měla minimální objem. K řešení poslouží Wheelerova rovnice uvedena v [1] a převedená na jednotky SI

$$L = \frac{3,15N^2r^2}{6r+9b+10a}, \quad [\mu\text{H}; \text{cm}, \text{cm}, \text{cm}] . \quad (7-1)$$

Wheelerův vztah (7-1) dosahuje přesnosti $\pm 1\%$ pro různé poměry $a : b : r$. Při optimálním poměru rozměrů se dosáhne největší přesnosti (7-1).



Obr. 7-1: Řez kotoučovou vzduchovou cívkou. [3]

K nalezení optimálního poměru rozměrů vzorec (7-1) se upraví pro dosazování v základních jednotkách

$$L = \frac{3,15 \cdot 10^{-5} N^2 r^2}{6r+9b+10a}, \quad [\text{H}; \text{m}, \text{m}, \text{m}] . \quad (7-2)$$

K optimalizaci je zvolen rozměr d_{min} jako základní a rozměry a , b jsou z něho definovány bezrozměrnými čísly α a β :

$$a = \alpha d_{min} . \quad (7-3a)$$

$$b = \beta d_{min} . \quad (7-3b)$$

Následně je třeba určit r a d_{max} :

$$r = \frac{1}{2}(1 + \alpha)d_{min} . \quad (7-4)$$

$$d_{max} = (1 + 2\alpha)d_{min} . \quad (7-5)$$

Počet závitů se vyjadřuje podle

$$N = \frac{\sigma}{I_{ef}} k_{p,Cu} ab = \frac{\sigma}{I_{ef}} k_{p,Cu} \alpha \beta d_{min}^2 . \quad (7-6)$$

Dosadím (7-3a), (7-3b), (7-4) a (7-6) do (7-2) vyplatí vztah

$$L = \frac{3,15 \cdot 10^{-5}}{4} \cdot \frac{\alpha^2 \beta^2 (1+\alpha)^2}{3+13\alpha+9\beta\alpha^2\beta^2(1+\alpha)^2} \cdot \frac{\sigma^2 k_{p,Cu}^2 d_{min}^5}{I_{ef}^2} . \quad (7-7)$$

Z ní se vyjádří d_{min}

$$d_{min} = \left[\frac{4}{3,15 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{3+13\alpha+9\beta}{\alpha^2 \beta^2 (1+\alpha)^2} \cdot \frac{LI_{ef}^2}{\sigma^2 k_{p,Cu}^2} \right]^{\frac{1}{5}}. \quad (7-8)$$

Objem vinutí

$$V_v = 2\pi r a b = \pi(1 + \alpha)\alpha\beta d_{min}^3. \quad (7-9a)$$

$$V_v = \pi \left[\frac{4}{3,15 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{LI_{ef}^2}{\sigma^2 k_{p,Cu}^2} \right]^{\frac{3}{5}} \left[\frac{(3+13\alpha+9\beta)^3}{(1+\alpha)\alpha\beta} \right]^{\frac{1}{5}}. \quad (7-9b)$$

Objem vinutí je tedy funkcí α a β . Extrém dvojrozměrné funkce $f_v(\alpha, \beta)$ lze nalézt tak, že funkci derivujeme podle obou proměnných a obě parciální derivace jsou rovny nule

$$\frac{\partial f_v(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial f_v(\alpha, \beta)}{\partial \beta} = 0.$$

Numerickým řešením byly nalezeny tyto výsledky

- $\alpha_{opt} = 0,4284$.
- $\beta_{opt} = 0,4762$.
- $f_{v,min} = 5,923052$.

Z nich jsou odvozeny optimalizované poměry rozměrů kotoučové vzduchové cívky:

$$a : b : r : d_{max} : d_{min} = \alpha : \beta : \frac{1}{2}(1 + \alpha) : (1 + 2\alpha) : 1. \quad (7-10)$$

$$\alpha_{opt} : b_{opt} : r_{opt} : d_{max,opt} : d_{min,opt} = 0,4284 : 0,4762 : 0,7142 : 1,8568 : 1. \quad (7-11)$$

Z poměrů uvedených v (7-11) je důležité stanovit rozměr $d_{min,opt}$. Tento rozměr lze vyjádřit dle [3] dvěma způsoby. Buď dle zadané proudové hustoty nebo podle dovoleného oteplení vinutí. Následující vztahy se vztahují na určení dovoleného oteplení vinutí. Pro vinutí kotoučové vzduchové cívky platí poměr ploch $\frac{S_{vz}}{S_v} = 1$. Pro návrh je důležité přesně stanovit činitel plnění vinutí z kapitoly 2.1. Rozměr $d_{min,opt}$ vyjadřuje

$$d_{min,opt} = 38,3708 \left[\frac{LI_{ef}^2 \rho_{Cu} \vartheta}{k_{p,Cu} \alpha_{cel} \Delta T} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (7-11)$$

výsledek vyjde v metrech při dosazování v základních jednotkách.

Proudovou hustotu σ vyjadřuje

$$\sigma = 0,480756 \left[\frac{\alpha_{cel}^5 \Delta T^5}{LI_{ef}^2 k_{p,Cu}^3 \rho_{Cu}^5 \vartheta} \right]^{\frac{1}{8}}. \quad (7-12)$$

Počet závitů N vyjadřuje

$$N = 144,399 \left[\frac{L^3 k_{p,Cu} \alpha_{cel} \Delta T}{I_{ef}^2 \rho_{Cu} \vartheta} \right]^{\frac{1}{8}}. \quad (7-13)$$

Objem vinutí V_v vyjadřuje

$$V_v = 2\pi r a b. \quad (7-14)$$

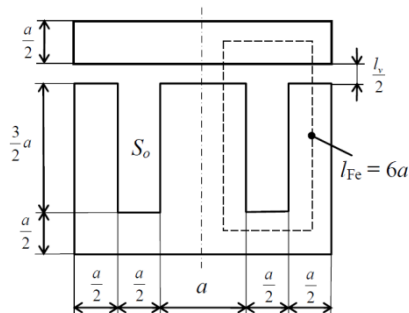
Objem mědi ve vinutí V_{Cu} vyjadřuje

$$V_{Cu} = V_v k_{p,Cu}. \quad (7-15)$$

8 TLUMIVKA NA JÁDRECH TYPU EI $a \times a$

V této kapitole jsou uvedené informace převzaty ze skript [2]. Jedná se o tlumivku s feromagnetickým obvodem a vzduchovou mezerou, kde feromagnetické jádro je složeno s plechů EI, jež mají normovaný rozměr a . Jeho normované velikosti jsou:

$$a = 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 64\text{mm.}$$



Obr. 7-1: Řez jádrem EI $a \times a$. [2]

Z Obr. 7-1 je patrné, že lze snadno určit parametry tlumivky v závislosti na přesnosti návržení rozměru a . Tento rozměr je vyjádřen v [2] dvěma způsoby. Buď dle zadané proudové hustoty nebo podle dovoleného oteplení vinutí. Následující vztahy se vztahují k určení rozměru a z dovoleného oteplení vinutí. Tím se dosáhne optimálního návrhu tohoto typu tlumivky.

Pro návrh rozměru a z dovoleného oteplení se použije vztah

$$a = \sqrt[7]{\frac{16 \cdot 4,5 L^2 I_{\max}^2 I_{ef}^2 \rho_{Cu} \vartheta}{9 \cdot 13 k_{p,Cu} k_{p,Fe}^2 B_{\max}^2 \Delta T \alpha_{cel}}}. \quad (8-1)$$

Dosazováním v základních jednotkách vyjde výsledek v metrech. Je důležité přesně stanovit činitel plnění vinutí $k_{p,Cu}$ dle (4.1-1). Činitel plnění v jádře feromagnetika $k_{p,Fe}$ pro jádro složené s plechů se pohybuje okolo hodnoty 0,95. Pro přesnější určení hodnoty $k_{p,Fe}$ pojednává kapitola 5.4. U vinutí tlumivky složené z EI $a \times a$ plechů se poměr plochy vyzařovací k celkové ploše vinutí pohybuje v rozmezí: $\frac{S_{vz}}{S_v} \in (0,90; 0,95)$.

Kritérium pro realizování vzduchové mezery vyjadřuje vztah

$$0,03 \leq \frac{l_v}{a} \leq 0,2. \quad (8-2)$$

Objem vinutí V_v vyjadřuje

$$V_v = 4,5 a^3. \quad (8-3)$$

Plochu jádra tlumivky S_j vyjadřuje

$$S_j = a^2. \quad (8-4)$$

Plochu okna pro vinutí tlumivky S_o vyjadřuje

$$S_o = \frac{3}{4} a^2. \quad (8-5)$$

Délka železa l_{Fe} vyjadřuje

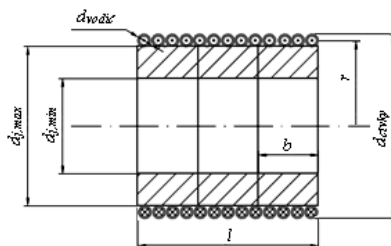
$$l_{Fe} = 6a. \quad (8-6)$$

Objem mědi ve vinutí vyjadřuje

$$V_{Cu} = 4,5k_{p,Cu}a^3. \quad (8-7)$$

9 TLUMIVKA S TYČOVÝM JÁDREM

Jedná se o tlumivku s tyčovým jádrem a jednovrstvým vinutím. Tyčové jádro se skládá z k sobě přiložených toroidů. Její řez je uveden na *Obr. 9-1*. Tato tlumivka byla realizována a změřené hodnoty jsou uvedeny v následující kapitole.



Obr. 9-1: Tlumivka s jádrem složeným z toroidů a jednovrstvým vinutím.

Indukčnost tlumivky vyjadřuje vztah odvozený ze základních elektromagnetických vztahů uvedených v kapitole 1:

$$L = N^2 \lambda_m = N^2 \frac{\lambda_{Fe} \lambda_v}{\lambda_{Fe} + \lambda_v}. \quad (9-1)$$

Jelikož se může magnetická vodivost feromagnetického jádra λ_{Fe} tlumivky zanedbat oproti magnetické vodivosti vzduchu λ_v , vyjádříme z (9-1) indukčnost L :

$$L \cong N^2 \lambda_v. \quad (9-2)$$

Pro určení parametrů vinutí se využije vztahů uvedených v kapitole 6 pro vzduchovou jednovrstvou válcovou tlumivku. Pro vyjádření délky použitého vodiče l_{Cu} ve vinutí platí rovnice (6-8), pro objem mědi ve vinutí V_{Cu} platí rovnice (6-9) a pro objem vinutí V_v platí rovnice (6-10).

10 REALIZACE TLUMIVEK S TYČOVÝM JÁDREM

Tlumivky se od sebe lišily počtem závitů a délkou feromagnetického jádra. Jádro bylo realizováno splením k sobě přiložených feritových toroidů, na které bylo navinuto jednovrstvé vinutí. Použité toroidní jádro mělo tyto rozměry

- Průměr vnitřní $d_{min} = 30\text{mm}$.
- Průměr vnější $d_{max} = 50\text{mm}$.
- Šířka jednoho toroidu $b = 19\text{mm}$.
- Průřez toroidu $S_{Fe} = \frac{\pi(d_{max}^2 - d_{min}^2)}{4} = \frac{\pi(50^2 - 30^2)}{4} = 1256,637\text{mm}^2$

Počet splených toroidních jader	$L_{jádra}$ [mm]
3	57
5	95
7	133
10	190

Tab. 10-1: Tabulka délek měřených skládaných feritových jader.

V Tab. 10-1 jsou uvedeny počty slepených toroidů a k nim odpovídající celková délka jádra. Proměřované cívky jsou zakresleny v příloze 1. Jádra byla k sobě slepována samolepící páskou. Na takto utvořeném jádru bylo z lanového vodiče navinuto rovnoměrně rozložené vinutí. Při ručním vinutí nemohlo být dosaženo absolutního rovnoměrného rozložení vinutí po jádře cívky.

V příloze 2 je uvedená tabulka naměřených hodnot. Pro jádro s deseti slepenými toroidními jádry a počtem závitů $N = 17$ bylo vinutí navinuto závit vedle závitů uprostřed slepeného feritového jádra. Naměřená indukčnost takové cívky činila $L = 92,74\mu\text{H}$.

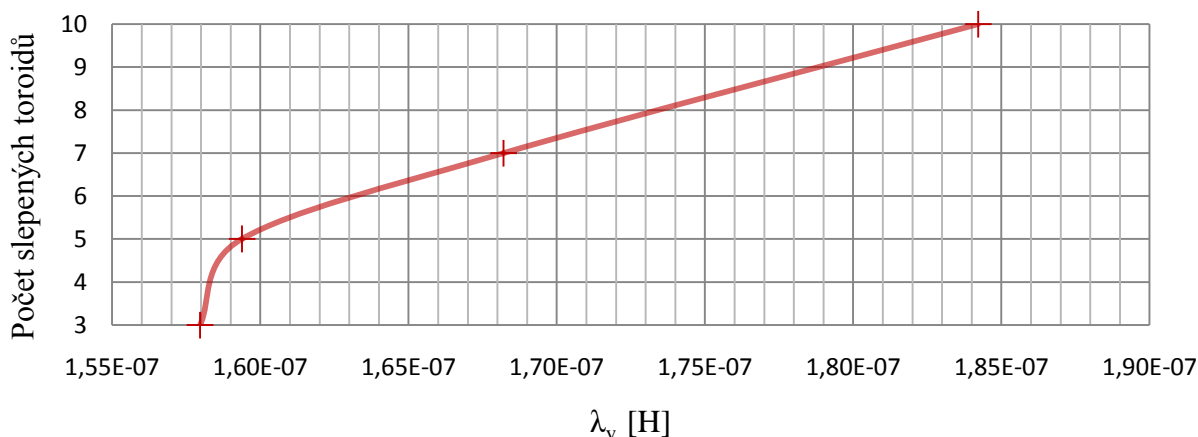
10.1 Zhodnocení měření tlumivek s tyčovým jádrem

Z naměřených hodnot v tabulce u uvedené v příloze 1 je zpracovaná Tab. 10.1-1, ve které jsou uvedeny parametry měřených tlumivek důležité pro analýzu z technicko-ekonomického hlediska.

N [-]	U [mV]	f [kHz]	Počet feritových toroidů	$l_{\text{jádra}}$ [mm]	L_p [μH]	λ_v [H]
8	100	100	10	190	11,79	1,84219E-07
			7	133	10,765	1,68203E-07
			5	95	10,2	1,59375E-07
			3	57	10,11	1,57969E-07

Tab. 10.1-1: Tabulka vyhodnocených hodnot z měření.

Jak je patrné z grafu uvedeného na Obr. 10.1-1, magnetická vodivost vzduchu λ_v nelineárně narůstá pro celý měřený rozsah slepených toroidních jader. Od slepení pěti a více toroidních jader je patrné linearizování nárůstu magnetické vodivosti λ_v .



Obr. 10.1-1: Graf závislosti λ_v na délce jádra z toroidů.

Z tohoto výsledku vyplývá, že pro návrh pro zadanou indukčnost bude třeba nalézt takovou délku jádra ze slepených toroidů, na kterou se vleze vinutí, které bude dimenzováno na požadovanou hodnotu efektivního proudu.

V druhém měření byly změřeny dvě tlumivky na jádře ze slepených deseti toroidních jader o délce $l_{\text{jádra}} = 190\text{mm}$. Počet závitů byl u obou stejný o velikosti $N = 17$.

- Tlumivka s vinutím závit vedle závitů uprostřed jádra $L = 92,74\mu\text{H}$.
- Tlumivka s rovnoměrně rozloženým vinutím $L = 47,97\mu\text{H}$.

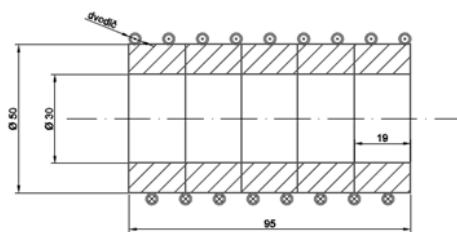
Z měření vyplynulo, že dle (10.1-1) tlumivka s vinutím poskládaným závit vedle závitu uprostřed feritového jádra má o 1,93 krát větší indukčnost, než tlumivka s rovnoměrně rozloženým vinutím.

$$\frac{L_{\text{vinutí závit vedle závitu uprostřed Fe jádra}}}{L_{\text{rovnoměrně rozložené vinutí}}} = \frac{92,74\mu\text{H}}{47,97\mu\text{H}} = 1,93 \text{ krát.} \quad (10.1-1)$$

10.2 Měření magnetické vazby sériově zapojených tlumivek s tyčovým jádrem

Pro měření jsme měli k dispozici tři tlumivky se stejným počtem závitů rovnoměrně rozloženými po celé délce feritového jádra. Dvě stejné tlumivky o následujících parametrech

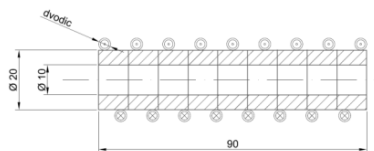
- Počet závitů $N = 8$.
- Indukčnost $L = 10,3\mu\text{H}$.
- Vnitřní průměr toroidního jádra; $d_{\min} = 30\text{mm}$.
- Vnější průměr toroidního jádra $d_{\max} = 50\text{mm}$.
- Šířka jednoho toroidu $b = 19\text{mm}$.
- Délka jádra z 5-ti složených toroidů $l_{\text{jádra}} = 95\text{mm}$.



Obr. 10.2-1: Řez měřenou tlumivkou.

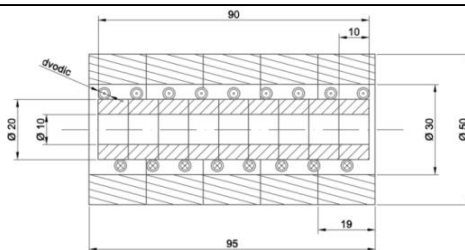
Třetí realizovaná menší tlumivka měla parametry

- Počet závitů: $N = 8$.
- Indukčnost: $L = 2,37\mu\text{H}$.
- Vnitřní průměr toroidního jádra: $d_{\min} = 10\text{mm}$.
- Vnější průměr toroidního jádra: $d_{\max} = 20\text{mm}$.
- Šířka jednoho toroidu: $b = 10\text{mm}$.
- Délka jádra z 9-ti složených toroidů: $l_{\text{jádra}} = 90\text{mm}$.



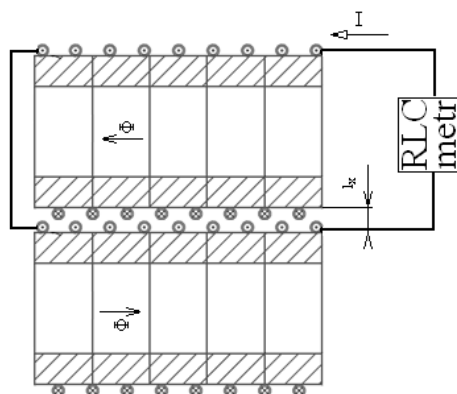
Obr. 10.2-2: Řez měřenou tlumivkou.

Tuto menší tlumivku jsme vložily do složeného feritového jádra z Obr. 10.2-2. Vznikla tlumivka uvedená na Obr. 10.2-3 a naměřená indukčnost měla hodnotu $L = 17,34\mu\text{H}$.



Obr. 10.2-3: Řez měřenou tlumivkou.

10.2.1 Tlumivky sériově spojené



Obr. 10.2.1-1: Zapojení tlumivek a LRC metru.

Pro zjištění magnetické vazby mezi měřenými tlumivkami byla změřena indukčnost přesným LRC metrem pro různou vzdálenost polohy l_x feritových jader.

Vzdálenost l_x [mm]	Indukčnost L [μ H]
5	34,37
10	26,66
20	24,54
30	23,27
40	22,68

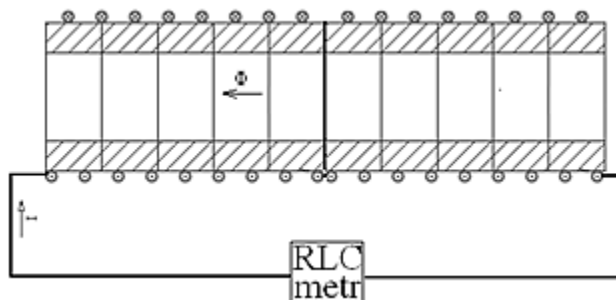
Tab. 10.2.1-1: Naměřené hodnoty.

Na naměřené hodnoty nemá vliv změna frekvence v mezích použitelnosti feritového jádra. Hodnoty byly proměřeny na frekvencích 20kHz a 100kHz.

Zvětšením průřezu feritového jádra taktéž neovlivníme indukčnost tlumivky. Zvětšení průřezu jádra tlumivky nám ale ovlivní pozitivně maximální magnetickou indukci B_{max} v jádře. Tím můžeme dovolit tlumivce pracovat na vyšší proudy při požadované indukčnosti, aniž bychom přesytily jádro tlumivky dle vzorce

$$I_{max} = \frac{NS_{Fe}B_{max}}{L}, \quad [A; -, mm^2, T, H]. \quad (10.2.1-1)$$

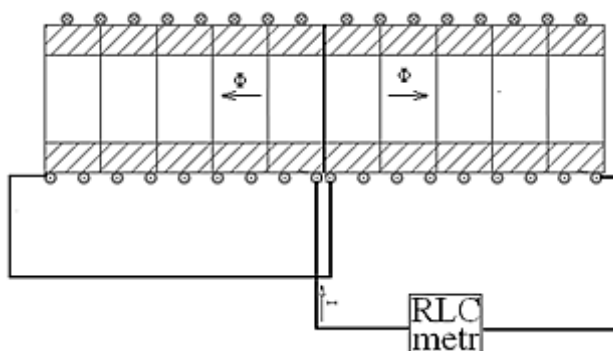
Na Obr. 10.2.1-2 vznikla tlumivka o $N = 16$, délce jádra $l_{jádra} = 190$ mm, u které byla naměřena indukčnost v rozsahu $L = 36 - 40\mu$ H. Rozptyl naměřené indukčnosti byl způsoben změnou velikosti vzduchové mezery. Ta se měnila proto, že jádra při sobě držela pouze lepicí páska.



Obr. 10.2.1-2: Sériové spojení tlumivek.

10.2.2 Tlumivky antisériově spojené

Na Obr. 10.2.2-1 je vidět zapojení, ve kterém se měly magnetické toky v jádře odčítat. Díky tomu by měla výrazně klesnout naměřená indukčnost. Parametrově je totožná s výše uvedenou tlumivkou a naměřená indukčnost při tomto zapojení je $L = 15,8\mu\text{H}$.



Obr. 10.2.2-1: Antisériové spojení tlumivek.

10.2.3 Zhodnocení měření magnetické vazby

U tlumivek zapojených do série dojde k největšímu nárůstu naměřené indukčnosti při nejmenší hodnotě vzdálenosti jader tlumivek $l_x = 5\text{mm}$:

$$\frac{34,37\mu\text{H}}{10,3\mu\text{H}+10,3\mu\text{H}} = 1,667 \text{ krát.}$$

Vložení tlumivky na tyčovém jádře do feromagnetického dutého válce došlo k velkému nárůstu indukčnosti:

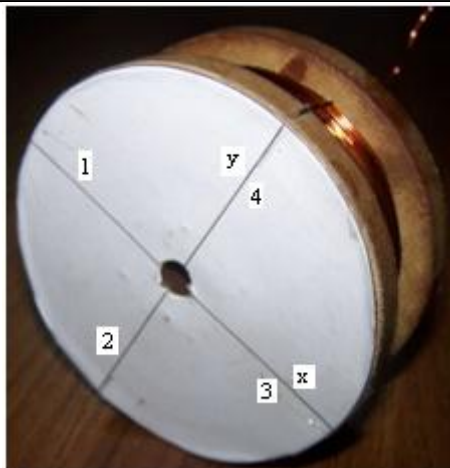
$$\frac{17,34\mu\text{H}}{2,37\mu\text{H}} = 7,32 \text{ krát.}$$

Tyto hodnoty dokazují, že tlumivka s tyčovým jádrem nemá velkou magnetickou vazbu. Při antisériovém zapojení tlumivek se ani nedosáhlo výrazného zmenšení indukčnosti:

$$\frac{15,8\mu\text{H}}{10,3\mu\text{H}+10,3\mu\text{H}} = 0,766 \text{ krát}$$

11 REALIZACE KOTOUČOVÉ VZDUCHOVÉ TLUMIVKY

Dle dostupných výrobních možností a materiálů byla realizována vzduchová cívka, která je zobrazena na Obr. 11-1, kde jsou zobrazeny osy x a y a na jejich koncích jsou umístěny měřicí pozice 1, 2, 3, 4. Na nich bylo provedeno kontrolní měření rozměrů vyrobené cívky.



Obr. 11-1: Rozložení os a pozic na cívce.

Cívka byla navinuta z lakovaného měděného drátu o průměru jádra $d_{cu} = 0,71\text{mm}$. Naměřená hodnota průměru vodiče činila $d = 0,745\text{mm}$. Navíjení vinutí cívky bylo ukončeno po dosažení počtu závitů o hodnotě $N = 600$. Navíjecí trn byl vyroben z PVC a boky byly vysoustruženy z umakartu. Ty pak byly na navíjecí trn přilepeny. V příloze 7 je uveden výkres kotoučové vzduchové cívky, na kterém je vyznačeno umístění indexů rozměrů používaných při výpočtech.

Při výrobě kostry cívky se nepodařilo přesně dodržet rozměr b . Při navíjení vinutí se nepovedlo dodržet rovnoměrné rozložení závitů vinutí do vrstev. Proto na d_{max} vznikly přeskoky a díry. Abychom byly schopni ověřit přesnost Wheelerova vzorce (7-1), byly naměřené hodnoty b a d_{max} zprůměrovány. Z těchto zprůměrovaných hodnot byly dopočteny rozměry a a r .

V jedné řadě se vlezlo maximálně 26 závitů, ale ty nevyplnily celý prostor daný rozměrem b a tak vznikl problém zobrazený příloze 3. Jelikož nebylo zajištěno dostatečné napínání navíjeného drátu, tak při začátku nové vrstvy v kombinaci s nevyplněným prostorem spodní vrstvy se začaly tvořit díry a přeskoky.

11.1 Naměřené rozměry kotoučové cívky

Rozměry kostry cívky jsou uvedeny na výkresu v příloze 7. Naměřené rozměry z Obr. 7-1 jsou uvedeny zde:

- Průměr navíjecího trnu $d_{min} = 40\text{mm}$.
- Průměr vinutí $d_{max} = 73,93527\text{mm}$.
- Průměr lakovaného vodiče $d = 0,745\text{mm}$.
- Šířka vinutí $b = 19,155\text{mm}$.
- Tloušťka vinutí $a = 16,96763\text{mm}$.
- Poloměr vinutí $r = 28,48382\text{mm}$.

V následujících odstavcích jsou uvedeny postupy měření jednotlivých rozměrů.

Průměr navíjecího trnu d_{min} byl změřen posuvným měřítkem. Navíjecí trn byl vyroben vysoustružením. Jedná o referenční rozměr, který byl na kostře vinutí vyroben nejpřesněji. Jeho velikost byla dodržena dle výkresu uvedeného v příloze 7.

Průměr vinutí d_{max} se nedal přesně změřit posuvným měřítkem, protože čelisti posuvného měřítka zapadaly do přeskoků vinutí. Vznik přeskoků je rozebrán v kapitole 5. Tyto přeskoky pak

způsobily nerovnoměrnost skutečného rozměru d_{max} . Jeho měření tedy spočívalo ve změření maximálně dosaženého průměru vinutí. Měření probíhalo tak, že kotoučová cívka byla upevněna kolmo k vodorovné desce. Přes širší část pravouhelníku, který byl přiložen k vinutí na příslušné ose cívky, byl změřen maximální rozměr průměru vinutí. Následně byly pořízeny detailní snímky přeskoků na pozicích z *Obr. 11-1*. Tyto snímky jsou zobrazeny v příloze 4 i s rozměry odečtenými v Autocadu [13]. Smysl tohoto měření spočíval v umístění objektivu fotografického zařízení ve stejné vzdálenosti od měřených pozic. Ohnisková vzdálenost je na všech snímcích stejná. Referenční rozměr tvoří nalepené kousky lakovaného drátu o změřeném průměru. Podělením skutečné velikosti drátu a velikosti v Autocadu [13] vyšlo měřítko, podle kterého byl pak vynásoben průměr ze sumy změn obrysu vinutí změřených v Autocadu [13]. Tyto hodnoty jsou zpracovány v tabulce uvedené v příloze 5.

Průměr lakovaného vodiče d se měnil v rozsahu od 0,73mm do 0,755mm. Byl měřen na více místech a průměrná hodnota vyšla $d = 0,745$ mm.

Šířka vinutí b nebyla na všech místech stejná. Nesouměrnost způsobil postup výroby kostry cívky, jelikož lepením se nedá nedosáhnout požadované souměrnosti. Proto se rozměr b mění na všech měřených pozicích.

Naměřený rozměr b na pozici 1	19,18 mm
Naměřený rozměr b na pozici 2	19,14 mm
Naměřený rozměr b na pozici 3	19,17 mm
Naměřený rozměr b na pozici 4	19,13 mm
Průměrná hodnota rozměru b	19,155 mm

Tab. 11.1-1: Určení průměrného rozměru b .

Tloušťka vinutí a nešla změřit přímo, jelikož kostra tlumivky přesahovala rozměr d_{max} . Tato hodnota se musela dopočítat z naměřené hodnoty d_{max} a d_{min} .

$$a = \frac{d_{max} - d_{min}}{2} = \frac{73,93527 - 40}{2} = 16,96763 \text{mm.}$$

Vzdálenost středu vinutí od středu cívky fyzicky změřit nejde, vypočítá se ze součtu polovičních hodnot rozměrů a a d_{min} .

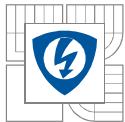
$$r = \frac{a}{2} + \frac{d_{min}}{2} = \frac{16,96763}{2} + \frac{40}{2} = 28,48382 \text{mm.}$$

11.2 Naměřené parametry kotoučové cívky

Naměřená indukčnost na LRC metru je uvedena v tab. *Tab. 11.2-1*. Měření bylo provedeno pro frekvence 66Hz, 77Hz a 300Hz.

No.	f [Hz]	L_s [mH]
1	66	17,8305
2	77	17,83
3	300	17,8292

Tab. 11.2-1: Tabulka naměřených hodnot indukčnosti cívky.



Průměrná hodnota z naměřených hodnot indukčností je označena jako $L_{měř}$ a má velikost 17,8299mH.

$$L_{měř} = \frac{L_{s1} + L_{s2} + L_{s3}}{3} = \frac{17,83045 + 17,83 + 17,82921}{3} = 17,82988667 \cdot 10^{-3} \text{H.}$$

Naměřený odpor vinutí je uveden v *Tab. 11.2-1*. Průměrná hodnota z naměřených hodnot odporů vinutí je označena jako $R_{měř}$ a má velikost 4,8231Ω.

No.	f [Hz]	R_s [Ω]
1	66	4,8228
2	77	4,8234

Tab. 11.2-1: Tabulka naměřených hodnot odporu vinutí cívky

$$R_{měř} = \frac{R_{s1} + R_{s2}}{2} = \frac{4,8228 + 4,8234}{2} = 4,8231 \Omega.$$

Naměřená parazitní kapacita nebyla změřena přímo. Pro její určení bylo využito možnosti grafického výstupu měřicího přístroje. Ten umožňoval měření impedance tlumivky při různých frekvencích. Tyto frekvence dokázal měnit v požadovaném kroku a do grafu zaznamenával příslušnou impedanci. Aby bylo možno zjistit velikost parazitní kapacity, byl určen z grafu rezonanční kmitočet, jehož nalezená hodnota činila $f_0 = 190\text{kHz}$. Ve vzorci (4.5-1) je naměřená parazitní kapacita označena jako $C_{p,měř}$ a její hodnota činí 39,3536pF.

$$C_{p,měř} = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L_{měř}} = \frac{1}{4 \cdot 3,14159^2 \cdot (190 \cdot 10^3)^2 \cdot 17,82988667 \cdot 10^{-3}} = 39,3536 \cdot 10^{-12} \text{F.}$$

11.3 Vypočtené parametry kotoučové cívky

Vypočítaná indukčnost L_{sp} byla vypočtena o hodnotě 17,93552mH. Pro výpočet byl použit vztah (7-2).

$$L_{sp} = \frac{3,15 \cdot 10^{-5} N^2 r^2}{6r + 9b + 10a} = \frac{3,15 \cdot 10^{-5} \cdot 600^2 \cdot (28,48382 \cdot 10^{-3})^2}{6 \cdot 28,48382 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 19,155 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 16,96763 \cdot 10^{-3}} = 17,93552 \cdot 10^{-3} \text{H.}$$

Činitel plnění vinutí $k_{p,Cu}$ vyšel 0,7309, což je dobrá hodnota, přestože při navíjení vinutí vznikly přeskoky.

$$k_{p,Cu} = \frac{NS_{Cu}}{ab} = \frac{600 \cdot 0,3959 \cdot 10^{-6}}{16,96763 \cdot 10^{-3} \cdot 19,155 \cdot 10^{-3}} = 0,7309.$$

Průřez vodiče S_{Cu} použitého lakovaného drátu se vypočte z průměru uvedeného od výrobce, která činí $d_{cu} = 0,71\text{mm}$. Vodič má kruhový průřez, z něhož určíme

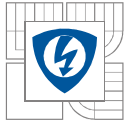
$$S_{Cu} = \frac{\pi d_{cu}^2}{4} = \frac{3,14159 \cdot 0,71^2}{4} = 0,3959 \text{mm}^2.$$

Vypočtený odpor vinutí R_{sp} vyšel 4,7464Ω. Pro výpočet odporu vinutí byla použita hodnota rezistivity mědi $\rho_{Cu} = 1,75\mu\Omega\text{cm}$. Tato hodnota je uvedena v literatuře [5].

$$R_{sp} = \frac{\rho_{Cu} l_{Cu}}{S_{Cu}} = \frac{0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 107381,4716 \cdot 10^{-3}}{0,3959 \cdot 10^{-6}} = 4,7464 \Omega.$$

Délka vodiče:

$$l_{Cu} = 2\pi N r = 2 \cdot 3,14 \cdot 600 \cdot 28,48382 = 107381,4716 \text{mm.}$$



Jelikož realizovaná kotoučová cívka má vinutí složené z více vrstev, parazitní kapacita se vypočte jako sériová kombinace mezivrstevových kapacit. Pro zjednodušení si lze představit, že každou vrstvu vinutí tvořenou lakovaným drátem o kruhovém průřezu a průměru d , nahradíme lakovaným plechem o šířce b a výšce l_{vr} .

Počet vrstev vinutí určíme podělením rozměru a průměrem lakovaného drátu. Vinutí obsahuje 22 vrstev, které označíme indexem n_{vr} :

$$n_{vr} = \frac{a}{d} = \frac{16,96763}{0,745} = 22,775 \cong 22. \quad (11.3-1)$$

Velikost vrstvy l_{vr} se dá odvodit jako

$$l_{vr} = \frac{a}{n_{vr}} = d_{cu} + l_i. \quad (11.3-2)$$

Ze vzorce je patrné, že vrstva je složena z určitého poměru mědi a izolantu, který je v našem případě konkrétně tvořen poměrem laku a vzduchu. Poměr mědi a izolantu ve vrstvě se dá odvodit z činitele plnění vinutí. Jelikož činitel plnění vinutí je poměrné číslo dvou ploch, je třeba ho převést na poměrné číslo délkového charakteru, který je označen jako $k_{p,Cu,l}$:

$$k_{p,Cu,l} = \sqrt{k_{p,Cu}}. \quad (11.3-3)$$

Zastoupení mědi ve vrstvě je označeno jako $d_{Cu, vr}$ a odvozeno z $k_{p,Cu,l}$:

$$d_{Cu, vr} = k_{p,Cu,l} l_{vr}. \quad (11.3-4)$$

Velikost izolace ve vrstvě je důležitá pro výpočet mezivrstevové kapacity a je označena jako $l_{vr,i}$:

$$l_{vr,i} = l_v - d_{Cu, vr} = \frac{a}{n_{vr}} - k_{p,Cu,l} l_v = \frac{a}{n_{vr}} (1 - \sqrt{k_{p,Cu}}). \quad (11.3-5)$$

Plocha vrstvy u kotoučové vzduchové cívky se vypočte dle

$$S_{vr} = 2\pi r b. \quad (11.3-6)$$

Kapacita mezi vrstvami C_{vr} vyšla 271,284pF. Jelikož nelze určit poměr vzduchu a laku, zavede se předpoklad, že celková plocha stykových bodů vrstev vinutí, kde se projevuje relativní permitivita izolace vodiče, bude o mnoho menší, než množství vzduchu, který u realizované vzduchové cívky vyplňuje mezery. Proto v našem případě dosadíme za ε_r hodnotu 1. Pokud by byla provedena impregnace vinutí, tak za ε_r se dosazuje hodnota relativní permitivity impregnační látky.

$$C_{vr} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S_{vr}}{l_{vr,i}} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2\pi r b n_{vr}}{a(1-\sqrt{k_{p,Cu}})}. \quad (11.3-7)$$

$$C_{vr} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2\pi r b n_{vr}}{a(1-\sqrt{k_{p,Cu}})} = 8,8542 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 28,48382 \cdot 10^{-3} \cdot 19,155 \cdot 10^{-3} \cdot 22}{16,96763 \cdot 10^{-3} \cdot (1-\sqrt{0,7309})}$$

$$C_{vr} = 271,284 \cdot 10^{-12} F.$$

Vypočtená parazitní kapacita $C_{p,sp}$ se musela stanovit z rozměrů kotoučové vzduchové cívky. Použije se závislost mezi vztahy uvedené v kapitole 4.5. Pro $C_{p,sp}$ se vyjádří (11.3-7) a (11.3-2) vztah:

$$C_{p,sp} = \frac{C_{vr}}{n_{vr}} = \frac{C_{vr} l_{vr}}{a} = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r r b l_{vr}}{l_{vr,i} a} = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r r b l_{vr} n_{vr}}{a^2 (1-\sqrt{k_{p,Cu}})} \cong \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r r b}{a(1-\sqrt{k_p})} \quad (11.3-8)$$

$$C_{p,sp} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 28,48382 \cdot 10^{-3} \cdot 19,155 \cdot 10^{-3}}{16,96763 \cdot 10^{-3} \cdot (1-\sqrt{0,7309})} = 12,331 \cdot 10^{-12} F.$$

11.4 Porovnání naměřených výsledků s vypočtenými

Odchylka spočítané hodnoty indukčnosti od naměřené:

$$\frac{L_{sp}}{L_{m\check{e}r}} = \frac{17,93552 \cdot 10^{-3}}{17,8299 \cdot 10^{-3}} = 1,0059 \Rightarrow 0,59\%.$$

Odchylka spočítané hodnoty odporu vinutí od naměřené:

$$\frac{R_{sp}}{R_{m\check{e}r}} = \frac{4,7464}{4,8231} = 0,9841 \Rightarrow -1,59\%.$$

Odchylka spočítané parazitní kapacity vinutí od naměřené:

$$\frac{C_{p,sp}}{C_{p,m\check{e}r}} = \frac{12,331 \cdot 10^{-12}}{39,3536 \cdot 10^{-12}} = 0,3133 \Rightarrow -68,66\%.$$

11.5 Korekce pro výpočet parazitní kapacity

Jelikož není znám poměr bodů styků laku ve vrstvách vůči vzduchu, lze vzít v potaz rozdíl spočítané hodnoty s dosazenou relativní permeabilitou vzduchu a naměřenou hodnotou parazitní kapacity. Výsledné číslo tedy bude udávat vypočtenou relativní permeabilitu, která je označena jako $\epsilon_{r,sp}$:

$$\epsilon_{r,sp} = \frac{C_{p,m\check{e}r}}{C_{p,sp}} = \frac{39,3536 \cdot 10^{-12}}{12,331 \cdot 10^{-12}} = 3,1914.$$

12 POROVNÁNÍ RŮZNÝCH TYPŮ TLUMIVEK

Pro porovnání tlumivek je zadána malá indukčnost a velká hodnota efektivního proudu. Každá tlumivka bude navrhnutá co nejpřesněji a následně budou v závěru všechny zhodnoceny. Všechny navržené tlumivky mohou být realizovány na dané frekvenci. V příloze 3 budou uvedeny příklady výpočtů. Zadání parametrů navrhovaných tlumivek:

- Indukčnost $L = 2,4\mu\text{H}$.
- Proud $I_{max} = I_{ef} = 750\text{A}$.
- Frekvence $f = 100\text{kHz}$.

Volené parametry navrhovaných tlumivek:

- Vinutí se silikonovou izolací

Výpočet se zadanou proudovou hustotou:

- Lanový vodič z měděného jádra.
- Proudová hustota $\sigma = 7,5\text{A/mm}^2$.

Výpočet s dovoleným oteplením:

- Dovoleno oteplení $\Delta T = 140^\circ\text{C}$.
- Absorpční konstanta $A = 0,65$.
- Bez nuceného chlazení.

Pro výpočet hmotnosti proudovodné části vinutí z mědi $E\text{-Cu}$ použijeme vzorec

$$m_{Cu} = \rho_{Cu} V_{Cu},$$

(12-1a)

kde dosazujeme za hustotu materiálu $\rho_{Cu} = 8960 \frac{Kg}{m^3}$.

Pokud je vinutí navinuto z hliníku *E-Al*, použijeme materiálovou hustotu $\rho_{Al} = 2700 \frac{Kg}{m^3}$ a vzorec

$$m_{Al} = \rho_{Al} V_{Al}. \quad (12-1b)$$

12.1 Návrh jednovrstvé válcové vzduchové tlumivky

Ze zadání máme stanovenou proudovou hustotu na hodnotu $\sigma = 7,5A/mm^2$, z čehož vychází průřez vodiče vinutí $S_{Cu} = 100mm^2$. Takový průřez jádra se pro lícny nedělá. Proto je volen průřez vodiče vinutí na hodnotu $S_{Cu} = 95mm^2$. Z [4] je proto stanoven:

- Průřez mědi vodiče: $S_{Cu} = 95mm^2$.
- Průměr vodiče: $d_{vodič} = 21,1mm$.

Z postupů a vzorců uvedených v kapitole 6 jsou výsledné hodnoty:

- Počet závitů $N = 6$.
- Proudová hustota $\sigma = 7,89A/mm^2$.
- Délka cívky $l_{civky} = 126,6mm$.
- Průměr cívky $d_{civky} = 127,65,mm$.
- Poloměr vinutí $r = 53,27mm$.
- Proudová hustota $\sigma = 7,89A/mm^2$.
- Objem vinutí $V_v = 894,159cm^3$.
- Objem mědi ve vinutí $V_{Cu} = 190,782cm^3$.
- Hmotnost mědi $m_{Cu} = 1,71kg$.
- Činitel plnění vinutí $k_{p,Cu} = 0,213$.
- Cena za E-Cu ve vinutí 174kč.

12.2 Návrh válcové tlumivky s tyčovým jádrem

Uvažované jádra byly změřeny s rovnoměrně rozloženým vinutím po celé délce jádra v kapitole 5. Nákresy rozměrů jádra jsou uvedeny v příloze 1, na které bylo navinuto vinutí z lícny použité k návrhu tlumivky z kapitoly 12.1.

- Průřez mědi vodiče: $S_{Cu} = 95mm^2$.
- Průměr vodiče: $d_{vodič} = 21,1mm$.

Z měření vychází hodnoty magnetické vodivosti vzduchu λ_v uvedené v *Tab. 10.1-1*. Pro výpočet potřebných závitů je upraven vztah (9-2) na tvar

$$N \cong \sqrt{\frac{L}{\lambda_v}}. \quad (12.2-1)$$

Vypočtené hodnoty N dle (12.2-1) jsou uvedeny v *Tab. 12.2-1*. Jak je z tabulky patrné, použitím různé délky jádra počet závitů vychází $N = 4$.

Počet toroidů	$l_{\text{jádra}}$ [mm]	λ_v [H]	N [-]
10	190	1,84E-07	3,6
7	133	1,68E-07	3,8
5	95	1,59E-07	3,9
3	57	1,58E-07	3,9

Tab. 12.2-1: Hodnoty N na délce tlumivky s tyčovým jádrem.

Délku tyčového jádra určuje předpoklad

$$l_{\text{jádra}} \geq l_{\text{vinutí}} \cdot \quad (12.2-2)$$

Délka vinutí je určena ze vzorce (6-2a) s výsledkem $l = l_{\text{vinutí}} = 84,4\text{mm}$. Podle (12.2-2) vyjde $l_{\text{jádra}} = 95\text{mm}$.

Na závěr návrhu je třeba zkontrolovat maximální hodnotu magnetické indukce B_{max} v jádře na vypočtený počet závitů N . Úpravou vzorce (1-15) lze vyjádřit vztah

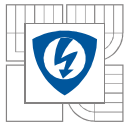
$$B_{\text{max}} = \frac{LI_{\text{max}}}{NS_{Fe}} \cdot \quad (12.2-3)$$

Výsledné hodnoty jsou:

- Počet závitů $N = 4$.
- Proudová hustota $\sigma = 7,89\text{A/mm}^2$.
- Průřez jádra $S_{Fe} = 1256,637\text{mm}^2$.
- Indukce v jádře $B_{\text{max}} = 0,358\text{T}$.
- Délka vinutí $l_{\text{vinutí}} = 84,4\text{mm}$.
- Délka jádra $l_{\text{jádra}} = 95\text{mm}$.
- Počet toroidů 5.
- Poloměr vinutí $r = 35,55\text{mm}$.
- Objem vinutí $V_v = 397,781\text{cm}^3$.
- Objem mědi ve vinutí $V_{Cu} = 84,878\text{cm}^3$.
- Hmotnost mědi $m_{Cu} = 0,76\text{kg}$.
- Činitel plnění vinutí $k_{p,Cu} = 0,213$.
- Cena za E-Cu ve vinutí 77kč.

12.3 Návrh kotoučové vzduchové tlumivky – vinuto Cu-lanem

Pro určení proudové hustoty je použito dovoleného oteplení vinutí. Z výpočtu je stanovena optimální proudová hustota $\sigma = 6,25\text{A/mm}^2$. Při hodnotě $k_{p,Cu} = 0,18$ se vybere vodič uvedený v [4] o průřezu $S_{Cu} = 120\text{mm}^2$.



Výsledně parametry jsou:

- Průřez mědi vodiče $S_{Cu} = 120\text{mm}^2$.
- Průměr vodiče $d_{vodič} = 23,8\text{mm}$.
- Počet závitů $N = 4$.
- Proudová hustota $\sigma = 6,25\text{A/mm}^2$.
- Trn vinutí $d_{min} = 115,46\text{mm}$.
- Průměr vinutí $d_{max} = 214,39\text{mm}$.
- Šířka vinutí $b = 54,98\text{mm}$.
- Výška vinutí $a = 49,46\text{mm}$.
- Poloměr vinutí $r = 82,46\text{mm}$.
- Objem vinutí $V_v = 1,409\text{dm}^3$.
- Objem mědi ve vinutí $V_{Cu} = 253,6\text{cm}^3$.
- Hmotnost mědi $m_{Cu} = 2,27\text{kg}$.
- Činitel plnění vinutí $k_{p,Cu} = 0,18$.
- Cena za E-Cu ve vinutí 231kč.

12.4 Návrh kotoučové vzduchové tlumivky – vinuto Al-plechem

Pro určení proudové hustoty je použito dovoleného oteplení vinutí. Jelikož se jedná o vinutí poskládané z E-Al plechů, je zvolena hodnota $k_{p,Al} = 0,8$.

Výsledně parametry jsou:

- Počet závitů $N = 5$.
- Proudová hustota $\sigma = 2,61\text{A/mm}^2$.
- Trn vinutí $d_{min} = 90,21\text{mm}$.
- Průměr vinutí $d_{max} = 167,50\text{mm}$.
- Šířka vinutí $b = 42,96\text{mm}$.
- Výška vinutí $a = 38,65\text{mm}$.
- Poloměr vinutí $r = 64,43\text{mm}$.
- Objem vinutí $V_v = 672,073\text{cm}^3$.
- Objem hliníku ve vinutí $V_{Al} = 537,657\text{cm}^3$.
- Hmotnost hliníku $m_{Al} = 1,45\text{kg}$.
- Činitel plnění vinutí $k_{p,Al} = 0,8$.
- Cena za E-Al ve vinutí 24kč.

12.5 Návrh kotoučové vzduchové tlumivky – vinuto Cu-plechem

Návrh je realizován stejně jako v kapitole 12.4. Rozdíl je v použitém materiálu vodiče vinutí. Výsledné parametry jsou:

- Počet závitů $N = 5$.
- Proudová hustota $\sigma = 3,57 \text{ A/mm}^2$.
- Trn vinutí $d_{min} = 79,5 \text{ mm}$.
- Průměr vinutí $d_{max} = 147,7 \text{ mm}$.
- Šířka vinutí $b = 37,9 \text{ mm}$.
- Výška vinutí $a = 34,1 \text{ mm}$.
- Poloměr vinutí $r = 56,8 \text{ mm}$.
- Objem vinutí $V_v = 460,4 \text{ cm}^3$.
- Objem mědi ve vinutí $V_{Cu} = 368,3 \text{ cm}^3$.
- Hmotnost mědi $m_{Cu} = 3,3 \text{ kg}$.
- Činitel plnění vinutí $k_{p,Cu} = 0,8$.
- Cena za E-Cu ve vinutí 336kč.

12.6 Vyhodnocení a porovnání navržených tlumivek

Pro názornost jsou výsledky návrhů z kapitoly 12 přepsány do tabulky *Tab.7-1*. V této tabulce jsou uvedeny pro vypočtené tlumivky hodnoty objemu vinutí V_v , objemu použitého vodiče vinutí $V_{vodič}$, hmotnost vodiče vinutí $m_{vodič}$ a cena vodiče vinutí. Hodnoty vypočtené ceny za použitý materiál jádra vodiče vinutí jsou orientačně převzaté z [6]:

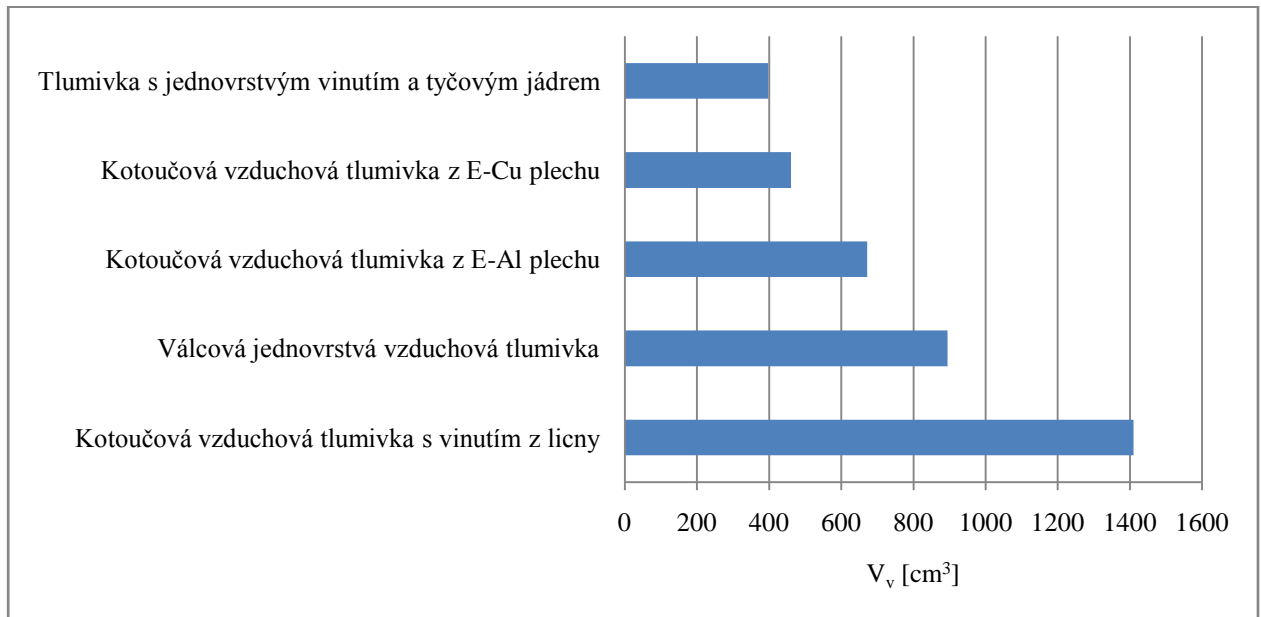
- Cena mědi: $Cu = 101,90 \text{ CZK/kg}$
- Cena hliníku: $Al = 16,30 \text{ CZK/kg}$

	V_v [cm ³]	$V_{vodič}$ [cm ³]	$m_{vodič}$ Kg	cena Kč
Válcová jednovrstvá vzduchová tlumivka	894,159	190,782	1,71	174
Tlumivka s jednovrstvým vinutím a tyčovým jádrem	397,781	84,878	0,76	77
Kotoučová vzduchová tlumivka s vinutím z lieny	1409	253,6	2,27	231
Kotoučová vzduchová tlumivka z E-Cu plechu	460,4	368,3	3,3	336
Kotoučová vzduchová tlumivka z E-Al plechu	672,073	537,658	1,45	24

Tab. 12.6-1: Tabulka vypočtených hodnot.

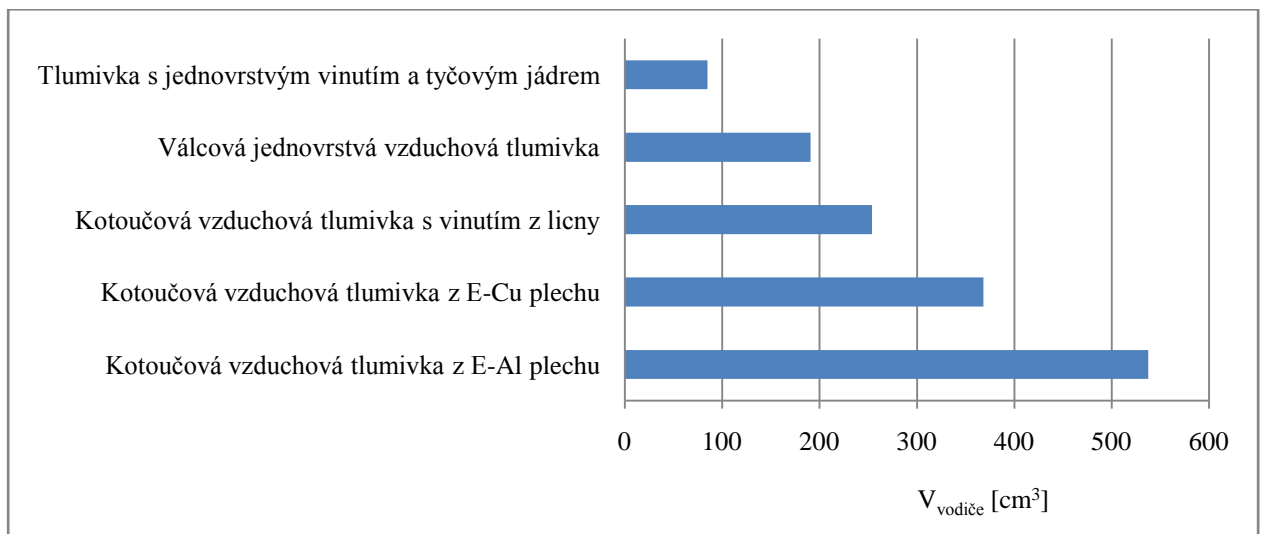
Vybrané parametry navržených tlumivek z *Tab. 12.6-1* jsou znázorněny a porovnány graficky.

Porovnání velikosti objemu vinutí V_v od nejmenšího k největšímu je zobrazeno na *Obr. 12.6-1*.



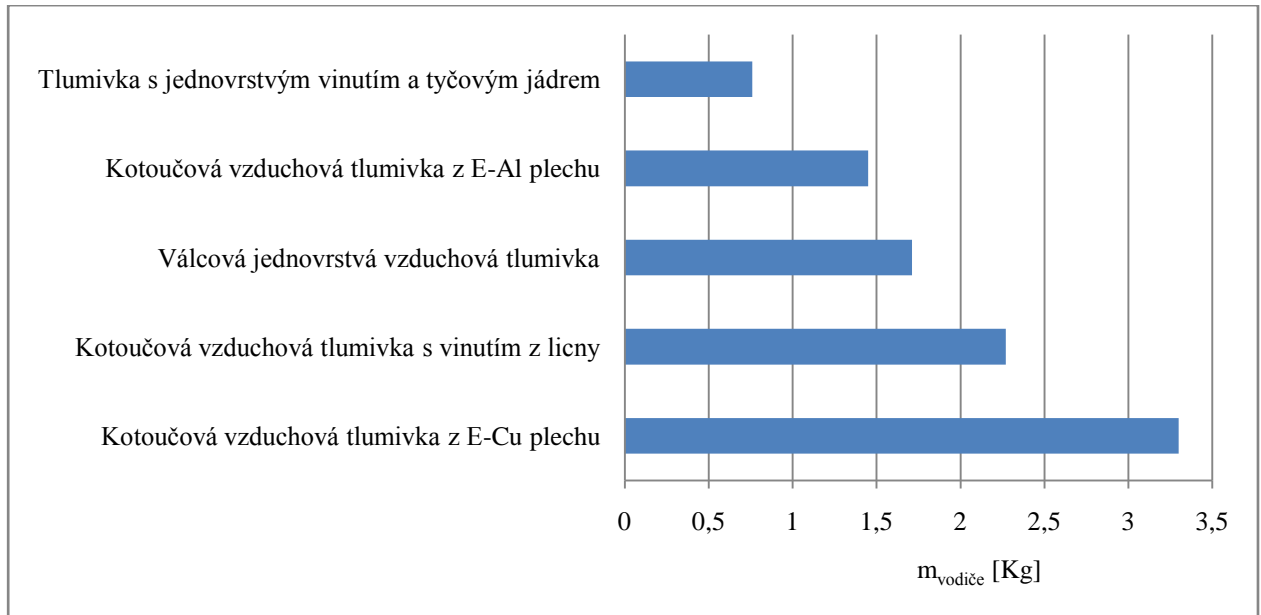
Obr. 12.6-1: Porovnání celkové velikosti vinutí navrhovaných tlumivek.

Porovnání velikosti objemu vodiče vinutí $V_{vodič}$ od nejmenšího k největšímu je zobrazeno na *Obr. 12.6-2*.



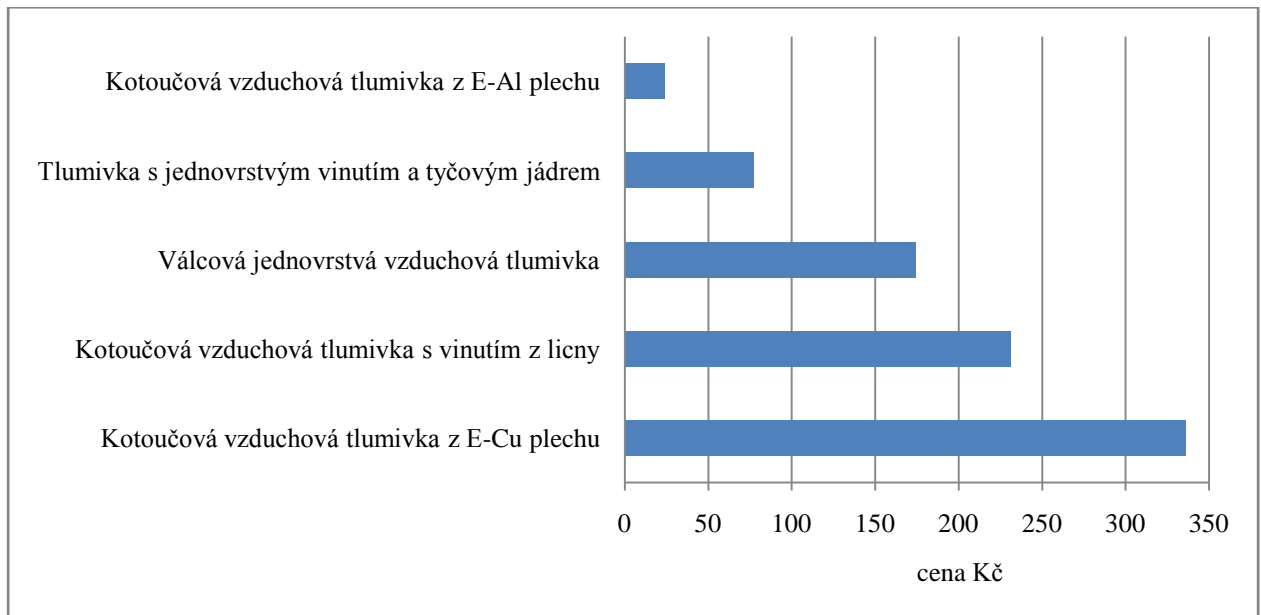
Obr. 12.6-2: Porovnání velikosti použitého vodiče ve vinutí navrhovaných tlumivek.

Porovnání hmotnosti vodiče vinutí $m_{\text{vodič}}$ od nejlehčího vinutí k nejtěžšímu je zobrazeno na Obr. 12.6-3.



Obr. 12.6-4: Porovnání hmotnosti vodiče ve vinutí navrhovaných tlumivek.

Porovnání ceny vodiče vinutí od nejlevnějšího k nejdražšímu je zobrazeno na Obr. 12.6-4.



Obr. 12.6-5: Porovnání ceny vodiče ve vinutí navrhovaných tlumivek.

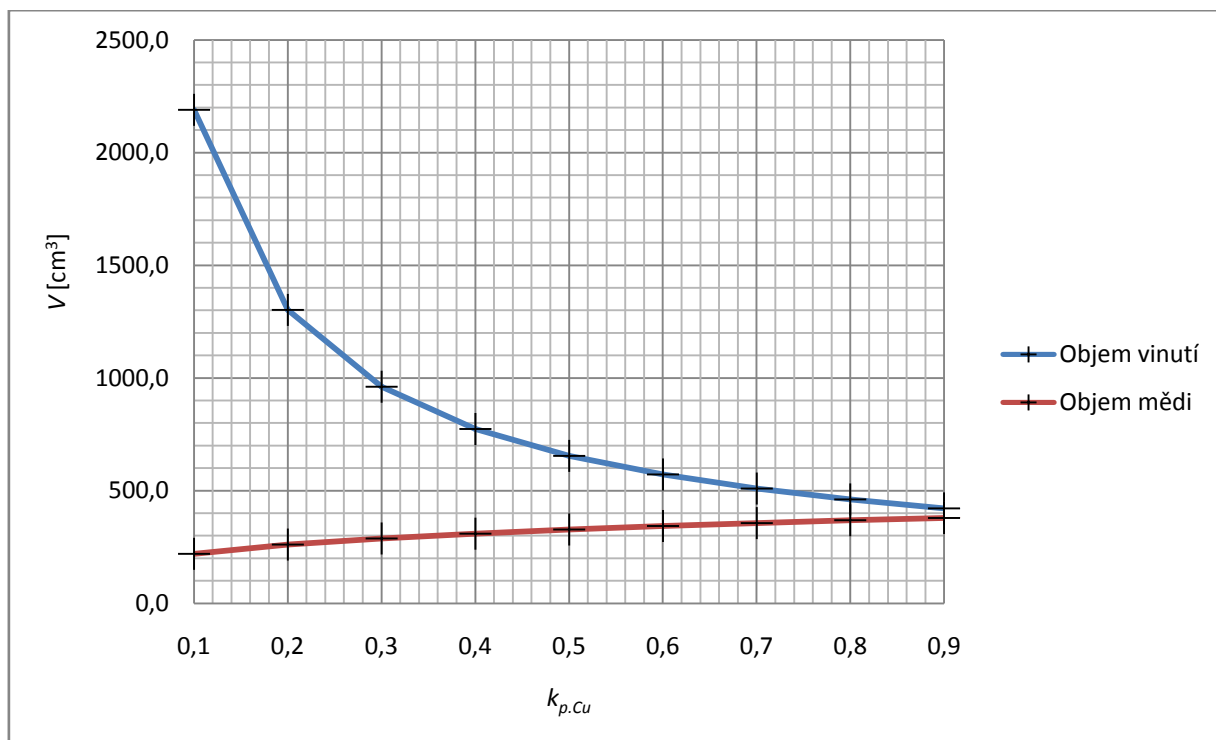
12.7 Závislost parametrů kotoučové vzduchové tlumivky na změně činitele plnění

V Tab.7.1-1 jsou uvedeny změny parametru navržené tlumivky na volbě činitele plnění $k_{p,Cu}$ v rozsahu od 0,1 do 0,9. Jedná se o navrhovanou tlumivku z kapitoly 12.5.

$k_{p,Cu}=$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
$N=$	4	4	4	5	5	5	5	5	5	-
$d_{max}=$	248,3	208,8	188,7	175,6	166,1	158,7	152,7	147,7	143,4	mm
$d_{min}=$	133,7	112,5	101,6	94,6	89,4	85,5	82,2	79,5	77,2	mm
$r=$	95,5	80,3	72,6	67,5	63,9	61,0	58,7	56,8	55,1	mm
$b=$	63,7	53,6	48,4	45,0	42,6	40,7	39,2	37,9	36,8	mm
$a=$	57,3	48,2	43,5	40,5	38,3	36,6	35,2	34,1	33,1	mm
$\sigma=$	7,8	6,0	5,2	4,6	4,3	4,0	3,8	3,6	3,4	A/mm ²
$S_{Cu}=$	96,3	124,9	145,4	162,0	176,1	188,6	199,8	210,0	219,5	mm ²
$d_{cu}=$	11,1	12,6	13,6	14,4	15,0	15,5	15,9	16,4	16,7	mm
$l_{cu}=$	2274,1	2085,3	1982,3	1912,3	1859,7	1817,8	1783,1	1753,5	1727,9	mm
$V_{Cu}=$	219,0	260,4	288,2	309,7	327,5	342,7	356,2	368,3	379,3	cm ³
$V_v=$	2190,0	1302,2	960,7	774,3	655,0	571,2	508,9	460,4	421,5	cm ³

Tab. 12.7-1: Parametry kotoučové vzduchové tlumivky na $k_{p,Cu}$.

Z tabulky je patrné, že s rostoucím činitelem plnění $k_{p,Cu}$ roste velikost objemu použité mědi V_{Cu} , ale zase klesá celková velikost vinutí V_v . Rostoucí objem mědi je daň za snížení velikosti tlumivky, což je znázorněno na Obr. 12.7-1. Aby se uchladiho vinutí na dovolené oteplení při teplotním spádu 5K, zmenšuje se proudová hustota.



Obr. 12.7-1: Graf V_{Cu} a V_v v závislosti na $k_{p,Cu}$.

13 ZÁVĚR

V práci byla ověřena vysoká přesnost Wheelerovy rovnice pro výpočet indukčnosti vzduchové kotoučové cívky. Na realizované vzduchové kotoučové cívice navržené podle optimalizovaných poměrů rozměrů vinutí byla odchylka naměřených hodnot od vypočtených 0,59%.

Optimalizovaný návrh vzduchové kotoučové cívky má jako základní rozměr stanoven trn vinutí. Ostatní rozměry cívky jsou uvedeny jako násobky základního rozměru. Při realizaci tlumivky se nosná kostra vyrobí podle optimálních poměrů rozměrů cívky. U vinutí tvořené vodičem s kruhovým profilem nastává problém v dosažení maximálního činitele plnění, jelikož navržené poměry rozměrů cívky neakceptují požadavek na vyplnění celé šířky nosné kostry vrstvou navinutého vodiče. To vede ke zhoršení činitele plnění. Použitím izolovaných plechů širokých jako šířka kostry vinutí lze dopočíst z navrženého průřezu vodiče výška plechu. Tím se docílí maximálního činitele plnění a minimalizování celkového objemu vinutí. Zmenší se ale chladičí plocha vinutí, což vede na požadavek zvýšení proudové hustoty a průřezu vodiče při stejné hodnotě dovoleného oteplení.

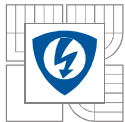
Měření parazitní kapacity vinutí spočívá ve změření rezonančního kmitočtu a v následném dopočítání kapacity z indukčnosti cívky. Výsledek měření se porovnal s hodnotou parazitní kapacity odvozené z mezizávitové kapacity a počtu vrstev vinutí. Odchylka činila až 31,4% při předpokladu, že se nebude projevovat permitivita izolace vodiče v bodě styku mezi sousedními závitů. Proto byla v práci určena korekce relativní permitivity o tuto odchylku.

U vzduchové jednovrstvové válcové tlumivky se nepodařilo nalézt postup pro optimální návrh vycházející pouze ze zvolené proudové hustoty ve vinutí. Pro optimální návrh uvedený v práci se využilo upraveného Wheelerova vztahu na výpočet indukčnosti takové tlumivky. Ze stanovené proudové hustoty se určí celkový průměr vodiče. Volením počtu závitů se určí délka tlumivky a porovnáváme ji s celkovým průměrem vinutí. Tlumivku považujeme za optimálně navrhnoutou, pokud se tyto dva rozměry přibližně rovnají.

Tlumivka s tyčovým jádrem byla realizována slepením feritových toroidů k sobě. Ze změřených parametrů tlumivky se odvodily vztahy pro návrh. Měřením se zkoušela magnetická vazba tlumivek, která se ukázala malá, jelikož mají velkou vzduchovou mezeru. Při sériovém zapojení tlumivek s vinutím přiloženým k sobě došlo k nárůstu indukčnosti 1,668 krát. Oddalováním vinutí indukčnost velmi rychle klesala na hodnotu sériového spojení dvou tlumivek bez magnetické vazby.

Pro vytvoření modelu komplexní permeability feritového materiálu se použil materiál jádra z výše uvedené tlumivky. Jeden toroid s šesti závitů rovnoměrně rozloženými po celém obvodu posloužil k vypracování postupu. Parametry modelu se podařilo získat jenom z naměřeného paralelního odporu a indukčnosti při nízkém a rezonančním kmitočtu.

Při porovnání navržených tlumivek na jednotné zadání vychází z ekonomického hlediska nejvýhodněji vzduchová kotoučová tlumivka navinutá z *E-Al* plechu, ale oproti nejmenší tlumivce s tyčovým jádrem má 1,69 krát větší objem vinutí. Při srovnání vzduchové jednovrstvé válcové tlumivky a tlumivky s tyčovým jádrem umožní použití tyčového jádra zmenšit velikost vinutí 2,25 krát. Pokud ale nejsou při realizaci tlumivky k dispozici feritová toroidní jádra, tak nejmenšího objemu vinutí lze dosáhnout kotoučovou vzduchovou tlumivkou navinutou z *E-Cu* plechu.

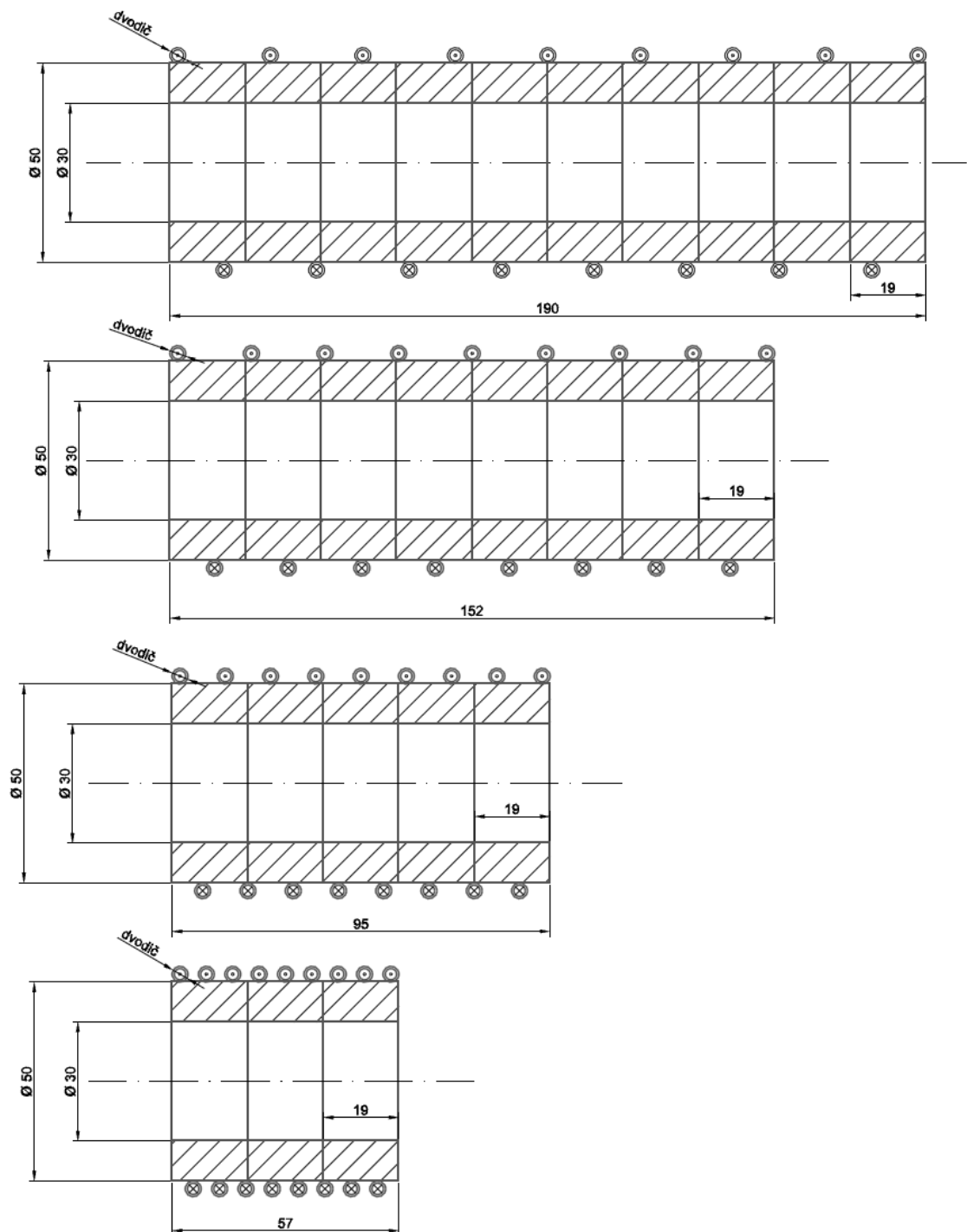


LITERATURA

- [1] Wheeler H. A.: Simple Inductance Formulas for Radio Coils. Proceedings of the I.R.E., October 1928, pp. 1398 – 1400.
- [2] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, Svazek IV, magnetické obvody ve výkonové elektronice, pulzní měniče s transformátorem. Skriptum VUT Brno, FEKT, Brno 2002, vydání druhé.
- [3] Patočka M.: Výkonové vzduchové cívky: jejich optimální konstrukční návrh. Výzkumná zpráva. Brno, 2010. 36 s
- [4] Nkrcables [online]. 2010 [cit. 2010-12-06]. Propojovací vodiče. Dostupné z WWW: <<http://www.nkrcables.cz/Products/2%20Power%20cables/~media/61EAB922ABAB45AD9E3FA144C7482CBA.ashx>>.
- [5] Kvartická rovnice. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-12-06]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kvartická_rovnice>.
- [6] Dopočty kovů CZ [online]. 2010 [cit. 2010-11-30]. Draka. Dostupné z WWW: <<http://www.draka.cz/titulka/52-dopocety-kovu-cz/280-dopocety-kovu-cz>>.
- [7] QuadTech. Product 53radiofy : LCR Meters [online]. 2007 [cit. 2011-05-16]. 7600 Plus Precision LCR Meter. Dostupné z WWW: <<http://www.quadtech.com/LCR-Meters-7600-Plus>>.
- [8] Tirpák A.: ELEKTROMAGNETIZMUS. Bratislava, 2004. 609 s. Skriptum, vydání druhé. Univerzita Komenského Bratislava, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Katedra radiofyziky. ISBN 80-88780-26-8.
- [9] Patočka M.: Řídící elektronika – pasivní obvody 1.díl. Skriptum. VUT Brno, FEKT. Brno, 2004.
- [10] Brandštetter P. a kol.: Elektronika – Prvky elektronických obvodů . Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 142 s. Skriptum. VŠB – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-1481-0.
- [11] Microsoft. Microsoft Office 2010 : Aplikace [online]. 2011 [cit. 2011-05-16]. Excel 2010. Dostupné z WWW: <<http://www.microsoft.com/cze/office2010/produkty/excel.aspx>>.
- [12] Openoffice.org [online]. 2011 [cit. 2011-05-16]. Calc. Dostupné z WWW: <<http://www.openoffice.org/product/calc.html>>.
- [13] Autodesk : Produkty [online]. 2011 [cit. 2011-05-16]. AutoCAD. Dostupné z WWW: <<http://www.autodesk.cz/adsk/servlet/pc/index?siteID=551663&id=14600953>>.
- [14] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, Svazek I, tepelné jevy, činný výkon. Skriptum VUT Brno, FEKT, Brno 2005.

Příloha 1

Nakreslené řezy tlumivkami s tyčovým jádrem.



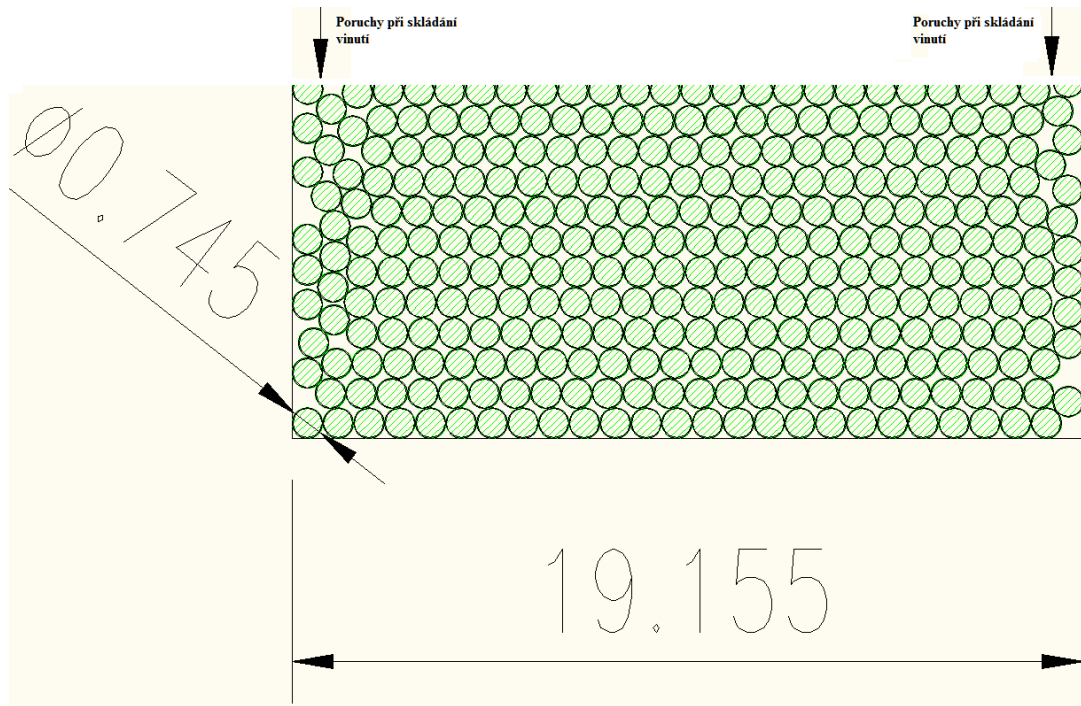
Příloha 2

Tabulka naměřených hodnot tlumivek s tyčovým jádrem.

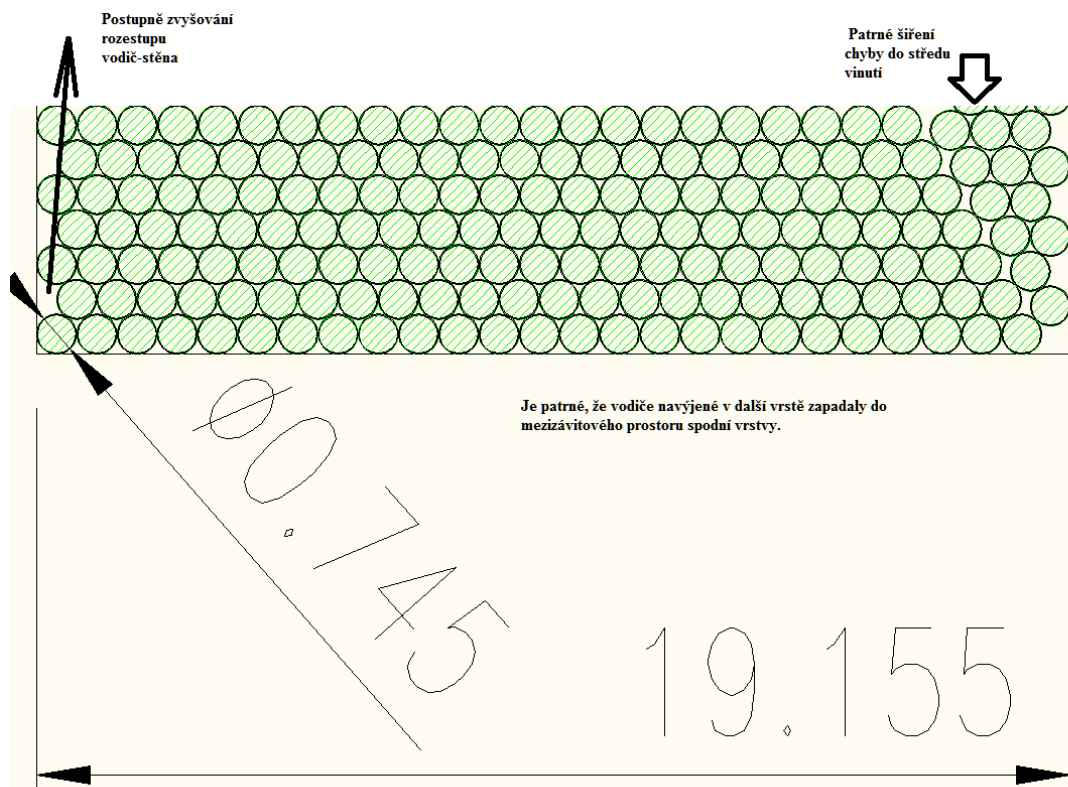
Parametry měřené cívky	č.m.	L_p [μ H]	R_p [Ω]	pozn.
$U = 100\text{mV}; f = 100\text{kHz};$ 10toroidů; $l_{cívky} = 190\text{mm};$ $N = 17$	1	47,97	7,78E+03	Dlouhé přívodní kabely
	2	47,88	7,86E+03	
$U = 100\text{mV}; f = 100\text{kHz};$ 7toroidů; $l_{cívky} = 133\text{mm};$ $N = 8$	1	11,92	959	Dlouhé přívodní kabely
	2	11,73	967,48	
	3	10,93	1,04E+03	
	4	10,92	-	Krátké přívodní kabely
	5	10,78		Krátké přívodní kabely, důraz na rovnoměrné rozložení závitů
	6	10,75		
$U = 100\text{mV}; f = 100\text{kHz};$ 3toroidů; $l_{cívky} = 57\text{mm};$ $N = 8$	1	10,95	888,68	Dlouhé přívodní kabely
	2	10,376	883,39	
	3	10,4	903,54	
	4	10,14	-	Krátké přívodní kabely
	5	10,12		Krátké přívodní kabely, důraz na rovnoměrné rozložení závitů
	6	10,1		
$U = 100\text{mV}; f = 100\text{kHz};$ 5toroidů; $l_{cívky} = 95\text{mm};$ $N = 8$	1	10,2	857,47	Dlouhé přívodní kabely
$U = 100\text{mV}; f = 100\text{kHz};$ 10toroidů; $l_{cívky} = 190\text{mm};$ $N = 8$	1	11,79	979	Dlouhé přívodní kabely
$U = 1\text{V}; f = 1\text{kHz};$ 10toroidů; $l_{cívky} = 190\text{mm};$ $N = 17$	1	47,97	132,96	Dlouhé přívodní kabely

Příloha 3

Zobrazení skládání vrstev vinutí:



Nákres skládání vrstev vinutí:

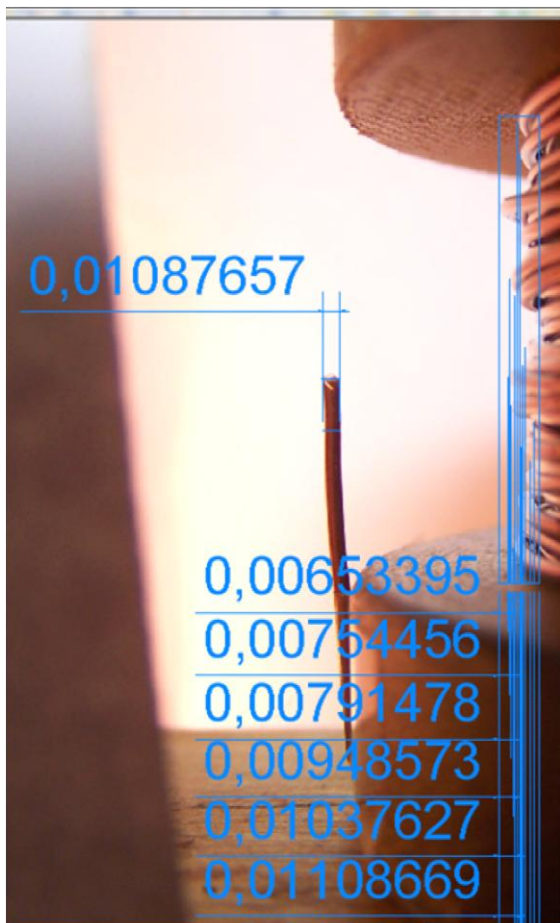


Příloha 4

Měření kotoučové vzduchové cívky na ose x

Pozice 1

Pozice 3



0,01087657

0,00653395

0,00754456

0,00791478

0,00948573

0,01037627

0,01108669

0,0120973

0,0125876

0,01376831

0,0142486

0,01469888

0,01592962

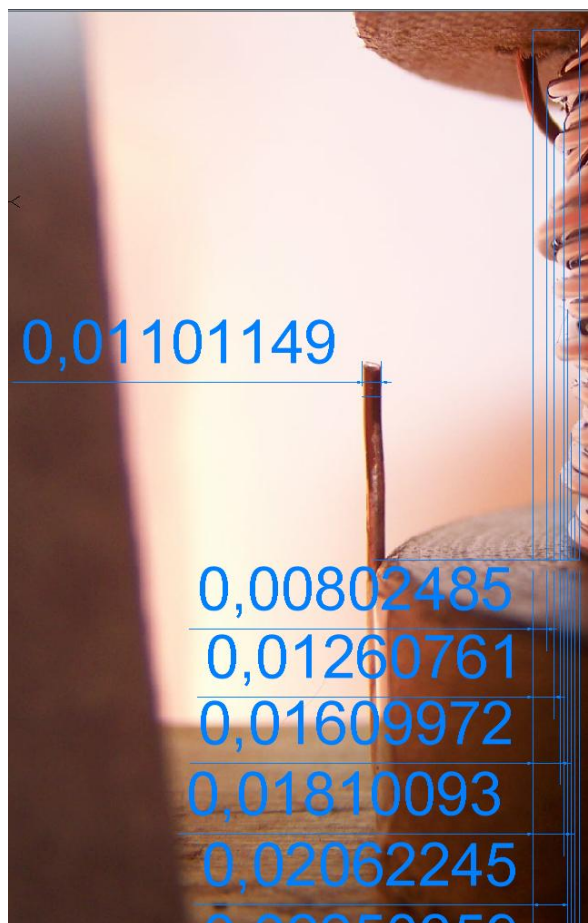
0,01714035

0,0177207

0,02096266

0,02378436

0,02706634



0,01101149

0,00802485

0,01260761

0,01609972

0,01810093

0,02062245

0,02250359

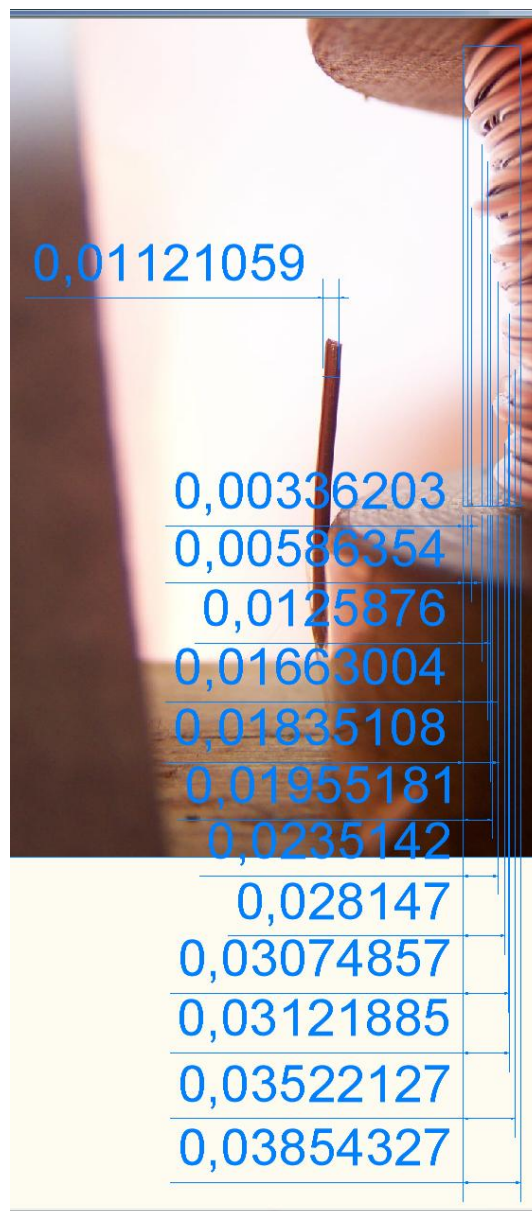
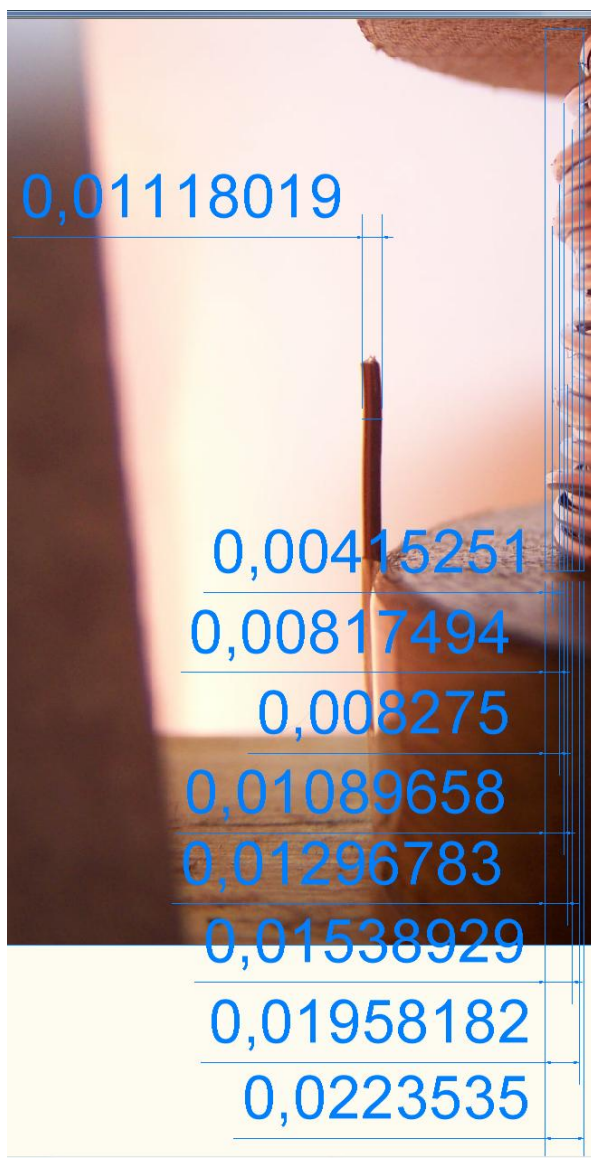
0,02489503

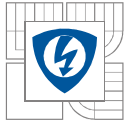
0,02750661

Měření kotoučové vzduchové cívky na ose y

Pozice 2

Pozice 4





Příloha 5

	HODNOTY ZÍSKANÉ Z MĚŘENÍ NA PŘÍSLUŠNÝCH POZICÍCH V [mm]					
Pozice 2	0,00415251	0,00817494	0,008275	0,01089658	0,01296783	0,01538929
	0,01958182	0,0223535				
Průměr drátu na pozici 2	0,01118019					
Pozice 4	0,00336203	0,00586354	0,0125876	0,01663004	0,01835108	0,01955181
	0,0235142	0,028147	0,03074857	0,03121885	0,03522127	0,03854327
Průměr drátu na pozici 4	0,01121059					
Pozice 1	0,00653395	0,00754456	0,00791478	0,00948573	0,01037627	0,01108669
	0,0120973	0,0125876	0,01376831	0,0142486	0,01469888	0,01592962
	0,01714035	0,0177207	0,02096266	0,02378436	0,02706634	
Průměr drátu na pozici 1	0,01087657					
Pozice 3	0,00802485	0,01260761	0,01609972	0,01810093	0,02062245	0,02250359
	0,02489503	0,02750661				
Průměr drátu na pozici 3	0,01101149					

Suma z měření na pozici 1: 0,242947 mm
Suma z měření na pozici 1: 0,101791 mm
Suma z měření na pozici 1: 0,150361 mm
Suma z měření na pozici 1: 0,263739 mm
Naměřený průměr drátu: 0,745 mm
Měřítka na pozici 1: 68,49586
Měřítka na pozici 1: 66,63572
Měřítka na pozici 1: 67,6566
Měřítka na pozici 1: 66,45502
Reálná hodnota sumy naměřených hodnot na pozici 1: 16,64084 mm
Reálná hodnota sumy naměřených hodnot na pozici 1: 6,782948 mm
Reálná hodnota sumy naměřených hodnot na pozici 1: 10,1729 mm
Reálná hodnota sumy naměřených hodnot na pozici 1: 17,5268 mm
Počet rozměrových změn na pozici 1: 17
Počet rozměrových změn na pozici 1: 8
Počet rozměrových změn na pozici 1: 8
Počet rozměrových změn na pozici 1: 12
Průměr na pozici 1: 0,978873 mm
Průměr na pozici 1: 0,847868 mm
Průměr na pozici 1: 1,271613 mm
Průměr na pozici 1: 1,460567 mm
Průměr z pozic 1 a 3 (osa x): 1,125243
Průměr z pozic 2 a 4 (osa y): 1,154217
Naměřená maximální velikost rozměru d_{max} na ose x: 74,71 mm
Naměřená maximální velikost rozměru d_{max} na ose y: 75,44 mm
Rozměr d_{max} na ose x: 73,58476 mm
Rozměr d_{max} na ose y: 74,28578 mm
Průměrná hodnota rozměru d_{max} : 73,93527 mm

Příloha 6

Vzduchová jednovrstvá válcová tlumivka

$$r = \frac{9L + \sqrt{((9L)^2 + 16,4N^3Ld_{\text{vodič}})}}{0,82N^2} = \frac{9 \cdot 2,4 + \sqrt{((9 \cdot 2,4)^2 + 16,4 \cdot 6^3 \cdot 2,4 \cdot 2,11)}}{0,82 \cdot 6^2}$$

$$r = 5,327 \text{ cm}$$

$$l = Nd_{\text{vodič}} = 6 \cdot 2,11 = 12,66 \text{ cm}$$

$$d_{\text{cívky}} = 2r + d_{\text{vodič}} = 2 \cdot 5,327 + 2,11 = 12,765 \text{ cm}$$

$$d_{\text{cívky}} \cong l$$

$$12,66 \text{ cm} \cong 12,765 \text{ cm}$$

$$l_{\text{Cu}} = 2\pi Nr = 2 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 5,327 = 200,823 \text{ cm}$$

$$V_{\text{Cu}} = S_{\text{Cu}} l_{\text{Cu}} = 95 \cdot 10^{-2} \cdot 200,823 = 190,782 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{V}} = \frac{\pi((2r + d_{\text{vodič}})^2 - (2r - d_{\text{vodič}})^2)}{4}$$

$$V_{\text{V}} = \frac{3,14 \cdot ((2 \cdot 5,327 + 2,11)^2 - (2 \cdot 5,327 - 2,11)^2)}{4} 12,66 = 894,159 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{Cu}} = V_{\text{Cu}} \rho_{\text{Cu}} = 190,782 \cdot 10^{-6} \cdot 8960 = 1,71 \text{ Kg}$$

$$\text{cena za } E\text{-Cu} = m_{\text{Cu}} \cdot 101,90 \text{ Kč} = 1,71 \cdot 101,90 = 174 \text{ Kč}$$

Tlumivka s jádrem z toroidů a jednovrstvým vinutím

$$N \cong \sqrt{\frac{L}{\lambda_{\text{v}}}} = \sqrt{\frac{2,4 \cdot 10^{-6}}{1,59 \cdot 10^{-7}}} = 3,885 \cong 4$$

$$l_{\text{vinutí}} = Nd_{\text{vodič}} = 4 \cdot 2,11 = 8,44 \text{ cm}$$

$$l_{\text{jádra}} \geq l_{\text{vinutí}}$$

$$9,5 \text{ cm} \geq 8,44 \text{ cm}$$

$$r = \frac{d_{\text{max}} + d_{\text{vodič}}}{2} = \frac{5 + 2,11}{2} = 3,555 \text{ cm}$$

$$B_{\text{max}} = \frac{LI_{\text{max}}}{NS_{\text{Fe}}} = \frac{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 750}{4 \cdot 1256,637 \cdot 10^{-6}} = 0,358 \text{ T}$$

$$l_{\text{Cu}} = 2\pi Nr = 2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 3,555 = 89,437 \text{ cm}$$

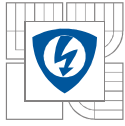
$$V_{\text{Cu}} = S_{\text{Cu}} l_{\text{Cu}} = 95 \cdot 10^{-2} \cdot 89,437 = 84,878 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{V}} = \frac{\pi((2r + d_{\text{vodič}})^2 - (2r - d_{\text{vodič}})^2)}{4} l$$

$$V_{\text{V}} = \frac{3,14 \cdot ((2 \cdot 3,555 + 2,11)^2 - (2 \cdot 3,555 - 2,11)^2)}{4} 8,44 = 397,781 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{Cu}} = V_{\text{Cu}} \rho_{\text{Cu}} = 84,878 \cdot 10^{-6} \cdot 8960 = 0,76 \text{ Kg}$$

$$\text{cena za } E\text{-Cu} = m_{\text{Cu}} \cdot 101,90 \text{ Kč} = 0,76 \cdot 101,90 = 77 \text{ Kč}$$



Kotoučová vzduchová tlumivka

$$a_{opt} : b_{opt} : r_{opt} : d_{max} : d_{min} = 0,4284 : 0,4762 : 0,7142 : 1,8568 : 1$$

Výpočty pro oteplení vinutí kotoučové vzduchové tlumivky:

$$\alpha_{cel} = [5 + 0,04(T - T_0) + 1,2v] + \frac{S_{vz}}{S_v} A \sigma \frac{T^4 - T_0^4}{T - T_0}$$

$$\alpha_{cel} = [5 + 0,04(180^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})] + 1 \cdot 0,65 \cdot 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{(453,15\text{K})^4 - (313,15\text{K})^4}{180^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}}$$

$$\alpha_{cel} = 19,17\text{W/Km}^2$$

$$\vartheta_v = T + \Delta T + \Delta T_{ts} = 40^\circ\text{C} + 140^\circ\text{C} + 5\text{K} = 185^\circ\text{C}$$

Změna rezistivity vodiče vinutí na oteplení vinutí:

$$\rho_{Cu\vartheta} = \left(1 + \frac{\vartheta_v - 20^\circ\text{C}}{234,5 + 20^\circ\text{C}}\right) \rho_{Cu 20} = \left(1 + \frac{185^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{234,5 + 20^\circ\text{C}}\right) 1,78 \cdot 10^{-8} = 2,934 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$$

$$\rho_{Al\vartheta} = \left(1 + \frac{\vartheta_v - 20^\circ\text{C}}{244 + 20^\circ\text{C}}\right) \rho_{Cu 20} = \left(1 + \frac{185^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{244 + 20^\circ\text{C}}\right) 2,99 \cdot 10^{-8} = 4,86 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$$

Vinutí kotoučové vzduchové tlumivky z ličny

$$d_{min} = 38,3708 \left[\frac{L I_{ef}^2 \rho_{Cu\vartheta}}{k_p \rho_{Cu} \alpha_{cel} \Delta T} \right]^{\frac{1}{4}} = 38,3708 \left[\frac{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 750^2 \cdot 2,934 \cdot 10^{-8}}{0,18 \cdot 19,17 \cdot 140} \right]^{\frac{1}{4}} = 0,11546\text{m}$$

$$\sigma = 0,480756 \left[\frac{\alpha_{cel}^5 \Delta T^5}{L I_{ef}^2 k_p^3 \rho_{Cu}^5 \rho_{Cu\vartheta}} \right]^{\frac{1}{8}} = 0,480756 \left[\frac{19,17^5 \cdot 140^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 750^2 \cdot 0,18^3 \cdot (2,934 \cdot 10^{-8})^5} \right]^{\frac{1}{8}}$$

$$\sigma = 6247583,6 \text{ A/m}^2 = 6,25 \text{ A/mm}^2$$

$$N = 144,399 \left[\frac{L^3 k_p \rho_{Cu} \alpha_{cel} \Delta T}{I_{ef}^2 \rho_{Cu\vartheta}} \right]^{\frac{1}{8}} = 144,399 \left[\frac{(2,4 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 0,18 \cdot 19,17 \cdot 140}{750^2 \cdot 2,934 \cdot 10^{-8}} \right]^{\frac{1}{8}} = 4,078 \cong 4$$

$$a = 0,4284 \cdot d_{min} = 0,4284 \cdot 115,46\text{mm} = 49,46\text{mm}$$

$$b = 0,4762 \cdot d_{min} = 0,4762 \cdot 115,46\text{mm} = 54,98\text{mm}$$

$$r = 0,7142 \cdot d_{min} = 0,7142 \cdot 115,46\text{mm} = 82,46\text{mm}$$

$$d_{max} = 1,8568 \cdot d_{min} = 1,8568 \cdot 115,46\text{mm} = 214,39\text{mm}$$

$$V_v = 2\pi r a b = 2 \cdot 3,14 \cdot 8,246 \cdot 4,946 \cdot 5,498 = 1409\text{cm}^3$$

$$V_{Cu} = V_v k_{p,Cu} = 1409 \cdot 0,18 = 253,62\text{cm}^3$$

$$m_{Cu} = V_{Cu} \rho_{Cu} = 253,62 \cdot 10^{-6} \cdot 8960 = 2,27\text{Kg}$$

$$\text{cena za } E\text{-Cu} = m_{Cu} \cdot 101,90 \text{ Kč} = 2,27 \cdot 101,90 = 231\text{Kč}$$

Vinutí kotoučové vzduchové tlumivky z E-Al plechu

$$d_{\min} = 38,3708 \left[\frac{L I_{\text{ef}}^2 \rho_{\text{Al}}}{k_{\text{p,Al}} \alpha_{\text{cel}} \Delta T} \right]^{\frac{1}{4}} = 38,3708 \left[\frac{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 750^2 \cdot 4,86 \cdot 10^{-8}}{0,8 \cdot 19,17 \cdot 140} \right]^{\frac{1}{4}} = 0,09021 \text{ m}$$

$$\sigma = 0,480756 \left[\frac{\alpha_{\text{cel}}^5 \Delta T^5}{L I_{\text{ef}}^2 k_{\text{p,Al}}^3 \rho_{\text{Al}}^5} \right]^{\frac{1}{8}} = 0,480756 \left[\frac{19,17^5 \cdot 140^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 750^2 \cdot 0,8^3 \cdot (4,86 \cdot 10^{-8})^5} \right]^{\frac{1}{8}}$$

$$\sigma = 2604926,2 \text{ A/m}^2 = 2,61 \text{ A/mm}^2$$

$$N = 144,399 \left[\frac{L^3 k_{\text{p,Al}} \alpha_{\text{cel}} \Delta T}{I_{\text{ef}}^2 \rho_{\text{Al}}} \right]^{\frac{1}{8}} = 144,399 \left[\frac{(2,4 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 0,8 \cdot 19,17 \cdot 140}{750^2 \cdot 4,86 \cdot 10^{-8}} \right]^{\frac{1}{8}} = 4,61 \cong 5$$

$$a = 0,4284 \cdot d_{\min} = 0,4284 \cdot 90,21 \text{ mm} = 38,65 \text{ mm}$$

$$b = 0,4762 \cdot d_{\min} = 0,4762 \cdot 90,21 \text{ mm} = 42,96 \text{ mm}$$

$$r = 0,7142 \cdot d_{\min} = 0,7142 \cdot 90,21 \text{ mm} = 64,43 \text{ mm}$$

$$d_{\max} = 1,8568 \cdot d_{\min} = 1,8568 \cdot 90,21 \text{ mm} = 167,5 \text{ mm}$$

$$V_v = 2\pi r a b = 2 \cdot 3,14 \cdot 6,443 \cdot 3,865 \cdot 4,296 = 672,073 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{Al}} = V_v k_{\text{p,Al}} = 672,073 \cdot 0,8 = 537,657 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{Al}} = V_{\text{Al}} \rho_{\text{Al}} = 537,657 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 = 1,45 \text{ Kg}$$

$$\text{cena za } E\text{-Al} = m_{\text{Al}} \cdot 16,30 \text{ Kč} = 1,45 \cdot 16,30 = 24 \text{ Kč}$$

Vinutí kotoučové vzduchové tlumivky z E-Cu plechu

$$d_{\min} = 38,3708 \left[\frac{L I_{\text{ef}}^2 \rho_{\text{Cu}}}{k_{\text{p,Cu}} \alpha_{\text{cel}} \Delta T} \right]^{\frac{1}{4}} = 38,3708 \left[\frac{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 750^2 \cdot 2,934 \cdot 10^{-8}}{0,8 \cdot 19,17 \cdot 140} \right]^{\frac{1}{4}} = 0,0795 \text{ m}$$

$$\sigma = 0,480756 \left[\frac{\alpha_{\text{cel}}^5 \Delta T^5}{L I_{\text{ef}}^2 k_{\text{p,Cu}}^3 \rho_{\text{Cu}}^5} \right]^{\frac{1}{8}} = 0,480756 \left[\frac{19,17^5 \cdot 140^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 750^2 \cdot 0,8^3 \cdot (2,934 \cdot 10^{-8})^5} \right]^{\frac{1}{8}}$$

$$\sigma = 3570824 \text{ A/m}^2 = 3,57 \text{ A/mm}^2$$

$$N = 144,399 \left[\frac{L^3 k_{\text{p,Cu}} \alpha_{\text{cel}} \Delta T}{I_{\text{ef}}^2 \rho_{\text{Cu}}} \right]^{\frac{1}{8}} = 144,399 \left[\frac{(2,4 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 0,8 \cdot 19,17 \cdot 140}{750^2 \cdot 2,934 \cdot 10^{-8}} \right]^{\frac{1}{8}} = 4,91 \cong 5$$

$$a = 0,4284 \cdot d_{\min} = 0,4284 \cdot 115,46 \text{ mm} = 34,1 \text{ mm}$$

$$b = 0,4762 \cdot d_{\min} = 0,4762 \cdot 115,46 \text{ mm} = 37,9 \text{ mm}$$

$$r = 0,7142 \cdot d_{\min} = 0,7142 \cdot 115,46 \text{ mm} = 56,8 \text{ mm}$$

$$d_{\max} = 1,8568 \cdot d_{\min} = 1,8568 \cdot 115,46 \text{ mm} = 147,7 \text{ mm}$$

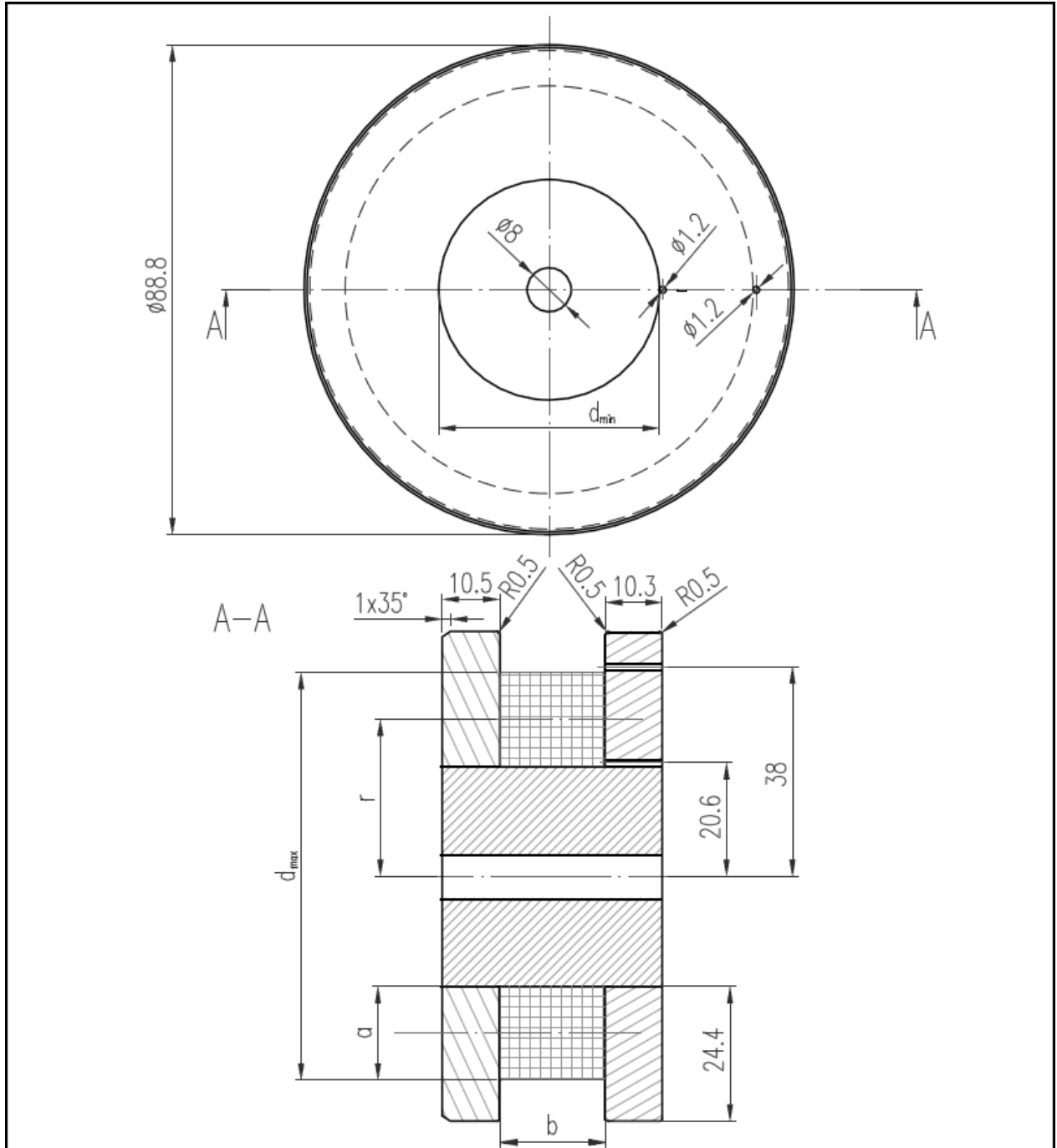
$$V_v = 2\pi r a b = 2 \cdot 3,14 \cdot 5,68 \cdot 3,41 \cdot 3,79 = 460,4 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{Cu}} = V_v k_{\text{p,Cu}} = 460,4 \cdot 0,8 = 368,3 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{Cu}} = V_{\text{Cu}} \rho_{\text{Cu}} = 368,3 \cdot 10^{-6} \cdot 8960 = 3,3 \text{ Kg}$$

$$\text{cena za } E\text{-Cu} = m_{\text{Cu}} \cdot 101,90 \text{ Kč} = 3,3 \cdot 101,90 = 336 \text{ Kč}$$

Příloha 7



		d)		PŘESNOST	Material	
		c)		TOLEROVÁNÍ	Polotovar	
		b)		PROMÍTÁNÍ \varnothing	Hmotnost	0.576 kg
		a)		Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Třída		
	Změna	Datum	Index	VUT Brno		
Měřítko	Poznámka	Navrhl		Název	KOTOUČOVÁ VZDUCH. CÍVKA	
1:1		Kreslil	Bc. Milan Škrla	Typ TYP		
Č.seznamu		Přezkoušel		Čís.výkresu		
Č.sestavy		Technolog				
Starý výkr.		Normalizace				
Nový výkr.		Schválil				
		Datum				