



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh středofrekvenční tlumivky

Autor práce: Aleš Přígrorský

Vedoucí práce: Ing. Jan Šobra

Plzeň 2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Aleš PŘIGROSKÝ**
Osobní číslo: **E16B0015K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh středofrekvenční tlumivky**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište funkci, různá konstrukční provedení a využití tlumivek v praxi.
2. Navrhněte středofrekvenční tlumivku dle zadání vedoucího práce.
3. Ověřte návrh metodou konečných prvků.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

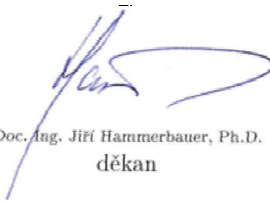
1. Patočka, Miroslav, Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
2. FAKTOR, Zdeněk, Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. Praha: BEN, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
3. FAKTOR, Zdeněk, Transformátory a cívky. Praha: BEN, 1999. ISBN 80-86056-49-X.
4. Petrov, Georgij Nikolajevič, Elektrické stroje 1: úvod-transformátory. Vyd. 1. Praha: Academia, 1980. 385 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Šobra

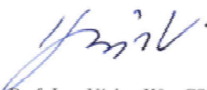
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kás, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Tato závěrečná práce se v první části zabývá souhrnem konstrukčních provedení tlumivek a jejich využití v praxi, přičemž je popsán princip a následně i funkce tlumivek. Druhá část práce je věnovaná návrhu středofrekvenční tlumivky a její simulaci metodou konečných prvků (MKP). Ověření výpočtu se poté porovná s návrhem v programu Rale. Poslední část závěrečné práce je věnována diskuzi nad výsledky simulací metodou konečných prvků a výpočtu.

Klíčová slova

Tlumivka, cívka, induktor, reaktor, metoda konečných prvků, MKP,

Abstract

Přigródký. *Design of Medium Frequency Inductor [Návrh středofrekvenční tlumičky]*. Pilsen, 2018. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Jan Šobra

The first part of bachelor thesis deals with the review of construction for choked-coils and their area of application in practice, where their principles and functions are described. The second part relates to design of medium frequency choked-coil with its simulation by finite element method. The verification of calculation is then compared with the Rale design output. The final part of the thesis is dedicated to discussion about results of a finite element method and a calculation.

Keywords

Choked-coil, coil, inductor, reactor, finite element method, FEM,

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 7. června 2018

Aleš Přigrodský

.....

Podpis

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	vi
1 Úvod	1
2 Cívka	2
2.1 Cívka a její chování	2
2.2 Cívka a její vlastnosti s požadavky	2
2.2.1 Indukčnost	3
2.2.2 Požadavky na vinutí	4
2.2.3 Maximální proud	6
2.3 Druhy cívek	7
2.3.1 Vzduchová cívka	7
2.3.2 Induktor	7
2.3.3 Náhradní schéma cívky	8
3 Tlumivka	10
3.1 Rozdělení tlumivek dle konstrukčního uspořádání	10
3.1.1 Suché a olejové tlumivky	11
3.1.1.1 Suché tlumivky	11
3.1.1.2 Olejové tlumivky	11
3.1.2 Rozdělení tlumivek podle typu magnetického obvodu	11
3.1.2.1 Tlumivky s feromagnetickým obvodem	11
3.1.2.2 Tlumivky bez feromagnetického obvodu	12
3.1.3 Rozdělení podle provozního prostředí	13
3.1.4 Rozdělení tlumivek z hlediska aplikace	13
3.1.4.1 Kompenzační tlumivka	13
3.1.4.2 Tlumivka pro omezení proudu v síti a mezi nulovým bodem a zemí	14
3.1.4.3 Filtrační, tlumící a vybíjecí tlumivky zapojené s kondenzátory	15
3.1.4.4 Zemní transformátory - tvořiče nulového bodu sítě	16
3.1.4.5 Zhášecí tlumivky	17

3.1.4.6	Vyhlazovací tlumivky	17
3.1.5	Rozdělení tlumivek podle typu magnetického obvodu	18
3.1.5.1	Tlumivky s feromagnetickým obvodem	18
3.1.5.2	Tlumivky bez feromagnetického obvodu	19
4	Magnetický obvod tlumivek	20
4.1	Magnetický obvod tlumivek	20
4.1.1	Feromagnetika	21
4.1.2	Ferity	21
4.2	Vinutí tlumivky	22
4.2.1	Základní požadavky	23
4.2.2	Konstrukce vinutí	26
4.2.3	Impregnace	27
5	Výpočet a návrh tlumivky	29
5.1	Zadání	29
5.2	Postupný výpočet	29
5.3	Minimalizace při zvoleném oteplení vinutí	33
5.4	Přepočet na nový magnetický obvod	33
5.5	Výpočet konečného vinutí	35
5.6	Výsledné shrnutí návrhu	36
6	Výsledky metody konečných prvků	38
7	Závěr	41
7.1	Diskuze a porovnání výsledků s předpokládanými daty	41
	Reference, použitá literatura	43
	Přílohy	45
	A Přílohy	45
	Rejstřík	52

Seznam symbolů a zkratek

a_0	Původní šířka středového sloupku[mm]
a	Šířka středového sloupku[mm]
A	Absorpční konstanta[-]
Al	Hliník
α	Činitel přestupu tepla[-]
B	Magnetická indukce[T]
B_{Fe}	Magnetická indukce železa[T]
B_{max}	Maximální indukce[T]
$\cos\phi$	Účinitel[-]
Cu	Měď
d	Průměr[m]
d_{i1}	Šířka plochého vodiče s přírůstkem izolace[mm]
d_{i2}	Výška plochého vodiče s přírůstkem izolace[mm]
Δp_{1T}	Ztrátové číslo při magnetické indukci=1T
E_P	Elektrická pevnost[MV/m]
f	Frekvence[Hz]
$f_{a.c.}$	Stejnoseměrná frekvence[Hz]
h	Výška vinutí[m]
I	Elektrický proud[A]
I_{ef}	Efektivní proud[A]
I_b	Budící proud[A]
I_c	Kapacitní proud[A]
$I_{d.c.}$	Stejnoseměrný proud[A]
I_n	Jmenovitý proud[A]
I_{max}	Maximální proud[A]
ϕ	Magnetický tok[Wb]
ϕ_c	Cívkový magnetický tok[Wb]
ϕ_k	Magnetický tok procházející jednotlivým závitem cívky[Wb]
$k_{p,cu}$	Celkový činitel plnění vinutí[-]
$k_{p,Fe}$	Činitel plnění železa v jádře[-]
K_v	Obecná konstanta[-]
k_z	Zatěžovací činitel[-]

l_{Fe}	Délka siločáry jádra[m]
l_v	Vzduchová mezera[m]
l_{vin}	Šířka vinutí[m]
$l_{z,st}$	Střední délka jednoho závitu[m]
L	Indukčnost[H]
L_d	Diferenciální indukčnost[H]
L_{inc}	Přírůstková indukčnost[H]
L_{reac}	Indukčnost z reaktance[H]
L_s	Sériová indukčnost[H]
n	Počet vrstev[-]
N	Počet závitů[-]
μ	Permeabilita[H/m]
μ_0	Permeabilita vakua[H/m]
μ_r	Relativní permeabilita[H/m]
$\mu_{r,Fe}$	Relativní permeabilita železa(plechů)[H/m]
p_x	Měrný ztrátový výkon[W/kg]
P_{Cu}	Ztrátový výkon v mědi[W/m ³]
R_L	Ztrátový odpor[Ω]
R_m	Reluktance[-]
R_p	Odpor reprezentující ztrátovou hysterezní energii
R_s	Sériový odpor - odpor vinutí[Ω]
$\rho_{Cu,20C}$	rezistivita mědi při 20 °C[Ω/m]
S	Povrch[m ²]
S_{Cu}	Průřez vinutí[m ³]
S_{Fe}	Čistá plocha feromagnetika[m ²]
S_j	Povrch jádra[m ²]
$S_{j,ch}$	Viditelný chladicí povrch vinutí[m ²]
S_o	Plocha okénka[m ²]
S_v	Viditelný chladicí povrch vinutí[m ²]
S_{vz}	Zářivý nezastíněný povrch[m ²]
σ	Proudová hustota[A/m ²]
σ_{sb}	Stefan-Boltzmanova konstanta[W/K ⁴ m ²]
T	Termodynamické teplo[K]
V_{Cu}	Objem mědi[m ³]
V_v	Objem vinutí[m ³]
V_{celk}	Celkový objem[m ³]
V_j	Objem jádra[m ³]
v	Rychlost foukání ochlazování[m/s]
U	Elektrické napětí[V]
x	Reaktance[Ω]

$x_{a.c.}$	Střídavá reaktance[Ω]
Z	Impedance[Ω]
Z_0	Impedance nulové složky[Ω]

1

Úvod

Tématem bakalářské práce je vypracovat dokument, který by ucelený přehledný souhrn konstrukčních provedení tlumivek, jejího chování, funkcí a v neposlední řadě také významu jejího praktického využití v elektrických obvodech.

Hlavní náplní práce ovšem bude návrh a následně samotné ověření správnosti návrhu metodou konečných prvků. Samostatný návrh bude doplněn o komentář popisující jednotlivé postupy a úvahy (volba typu a rozměrů magnetického obvodu, volba použitého vinutí, ...), tak aby byl text co nejvíce jasný a abychom co nejlépe došli k závěrům korespondujícím se zadaným zadáním. Výsledný návrh tlumivky bude pro kontrolu ověřen metodou konečných prvků (FEM), která bude výpočetně simulována pomocí programu Agros 2D. V této části práce se budeme zabývat rozložením elektromagnetického pole v okolí tlumivky a také rozložením teplot vně i uvnitř objemu tlumivky. Právě tato numerická metoda určí, zdali došlo ke správnému a efektivnímu návrhu z hlediska teplotních nároků na vinutí a magnetický obvod, elektromagnetických jevů, indukčnosti a dalších požadavků či vyskytujících se problémů. Návrhu tlumivek se věnuje celá řada odborných publikací v českém i anglickém jazyce, právě proto se dá čerpat z hned několika ucelených publikací. Cílem práce je vybrat správný směr s ohledem na zadání a tím pádem navrhnout tlumivku tak, aby splňovala všechny zadané požadavky (indukčnost tlumivky, teplotní třídu i konstrukci na magnetickém obvodu typu EI).

Závěr práce bude obsahovat srovnání návrhu středofrekvenční tlumivky s tlumivkou navrženou v profesionálním programu Rale. V tomto srovnání bude uvedena diskuse o tom, jakým způsobem se shoduje návrh tlumivky ze zadání bakalářské práce s návrhem tlumivky v programu.

2

Cívka

Cívkou obecně definujeme součástku, která se skládá z N závitů navinutých na nevodivé kostře. Cívku spolu s kondenzátorem řadíme do skupiny *akumulačních prvků*. To znamená, že tyto obvodové prvky umožňují akumulovat energii ve formě magnetického pole. De facto se tedy jedná o prvek, který v obvodu se stejnosměrným zdrojem plní funkci druhého zdroje. Charakter tohoto zdroje závisí na typu akumulačního prvku a jeho stavové veličiny. Tou se myslí veličina, jež se nemůže měnit skokově.[1]

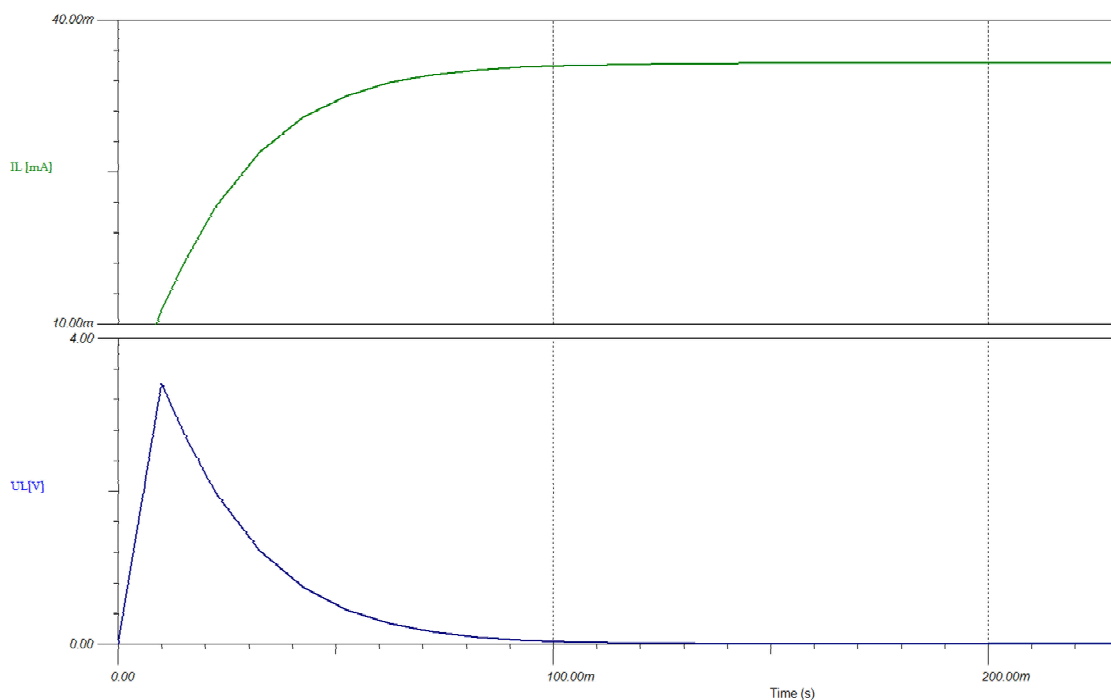
V případě kondenzátoru se jedná o charakter napěťového zdroje, neboť jeho stavovou veličinou je napětí (U). U induktoru je naopak stavovou veličinou proud (I) a tudíž se jedná o zdroj proudu a jeho hlavní vlastností je indukčnost L . [1]

2.1 Cívka a její chování

Právě spojitá schopnost reakce cívky na skokovou změnu proudu je jednou z hlavních důvodů, proč se tlumivky v obvodech využívají. Změnou budícího proudu (I_b) se vybudí magnetické pole, díky němuž má cívka (tlumivka) schopnost akumulovat energii, následně ve vhodném okamžiku tuto energii cívka opět uvolňuje do obvodu.[1] Chování cívky při skokové změně napětí, je naznačeno na níže uvedených průbězích (obrázek 2.1

2.2 Cívka a její vlastnosti s požadavky

Základním dělením cívek je dělení dle konstrukce, kdy první skupinou jsou cívky vzduchové (bez jádra) a cívky s feromagnetickým jádrem (induktor). Obě konstrukční provedení mají několik specifických elektrických vlastností, které definují jejich rozsah použití. Hlavním parametrem, který určuje podstatu jejich funkce, je pro oba typy bezesporu indukčnost L . Indukčnost i s dalšími parametry jsou uvedeny v následujících podkapitolách.



Obr. 2.1: Závislost proudu cívku na skokové změně napětí

2.2.1 Indukčnost

Jak již bylo řečeno, nejzásadnější vlastnosti cívek je jejich indukčnost L , jejíž hodnota je všeobecně kmitočtově závislá a *pro cívky s feromagnetickým jádrem je závislá i na budícím proudu protékajícím jejím vinutím*[6]. To však neplatí pro cívky vzduchové, ty totiž mají díky vzduchovému jádru lineární magnetickou charakteristiku (závislost mezi proudem I_b a magnetickým tokem Φ) a proto jejich indukčnost L vykazuje stejnou hodnotu bez ohledu na velikost proudu.[9] Pro cívku umístěnou na magnetickém obvodu platí že vztah její indukčnosti je závislý na stavu nasycení magnetického obvodu, tzn. na parametrech ϕ a I_b , nebo přesněji řečeno na tzv. *reluktanci* R_m . Vztahy pro statickou indukčnost jsou uvedeny níže, viz rovnice 2.2.1 a 2.2.1.[2]

$$L = \left| \frac{\phi}{i} \right| \quad (2.1)$$

$$L = \left| \frac{\phi_c}{I} \right| = \left| \frac{N \cdot \phi}{I} \right| \quad (2.2)$$

Při návrhu cívky je nutné brát v potaz, že *indukčnost je kmitočtově závislý parametr* a proto je nutné zajistit, aby cívka vykazovala stálou indukčnost v širokém rozsahu frekvencí. Z tohoto důvodu se při návrhu bere v úvahu tzv. vlastní rezonanční kmitočet cívky, který by měl být od provozní frekvence co nejvíce vzdálený. Mimo kmitočtu je indukčnost závislá také na tom, zda jde o cívku vzduchovou, či v opačném případě o cívku s jádrem z magnetických materiálů.

Oproti vzduchové cívce je výhodou cívky s magnetickým jádrem určitá stabilita

indukčnosti v širokém rozmezí frekvencí teplot (dolní a horní mezní pracovní teplota) i klimatických vlivů (vlhkost, teplota a teplotní rázy). Dalším pozitivem je určitá úspora z hlediska konstrukčních rozměrů, protože oproti vzduchovým cívkám jsou cívky s feritovými jádry mnohokrát menší.

Mimo výše uvedené vztahy pro statickou indukčnost lze indukčnost vyhodnotit i v diferenciálním tvaru. V tomto případě je indukčnost definována jako derivace sdruženého toku podle proudu, viz 2.3[3]

$$L_d = \frac{d\psi}{di} \quad (2.3)$$

Tam, kde se střídavý proud superponuje na stejnosměrný, určíme tzv. přírůstkovou indukčnost L_{inc} , viz 2.4. Kde $x_{a.c.}$ je v tomto případě reaktance odvozená z měření střídavého napětí a střídavého proudu při úrovni stejnosměrného proudu $I_{d.c.}$ [3]

$$L_{inc} = \frac{x_{a.c.}}{2 \cdot \pi \cdot f_{a.c.}} | I_{d.c.} \quad (2.4)$$

V některých případech je nutné si určit indukčnost z reaktance. Pro tyto případy máme indukčnost definovanou 2.5.[3]

$$L_{reac} = \frac{x}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (2.5)$$

2.2.2 Požadavky na vinutí

Netočivé elektrické stroje mají vinutí tvořeno vodiči navinutými na jednotlivých cívkách. V tomto vinutí se odehrávají různé děje, na které je nutné brát při návrhu zřetel. Při průchodu elektrického proudu vinutím vznikají ztráty (Jouleovy). Obvykle je tento měrný ztrátový výkon p_x [W/m³] větší než v železe. Z toho plyne, že oteplování vinutí ovlivňuje velikost tlumivky, neboť pro správnou funkci je nutné, aby se část vzniklých Jouleových ztrát vyzářila do okolního vzduchu, a to lze ovlivnit hlavně tím, že máme dostatečně veliký chladič povrch vinutí S_v . Minimální velikost cívky (resp. tlumivky), určují dvě kritéria.[4]

- Kritérium při zvolené proudové hustotě
- Kritérium při zvoleném oteplení vinutí

Lze tvrdit, že z hlediska funkčního významu vinutí vyplývá, že dobře technicky a zároveň technologicky řešené vinutí je předpokladem pro dobře funkční, kvalitní, spolehlivý a tím pádem i ekonomicky výhodný výrobek (zařízení). Jelikož zákazník může mít různorodé požadavky na funkční parametry zařízení, tak i rozsahy provedení samotného vinutí jsou velmi široké. Spektrum používaných materiálů pro vinutí cívek je značně omezené, ale dostačující.[5] V zásadě používáme druhy vodičů z elektrolyticky žíhané mědi (Cu) a elektrolytického hliníku (Al), přičemž tvar vodičů je kruhový, plochý obdélníkový, fóliový, a nebo tvaru VF lanka.

Pro konstrukční návrh je nutno předem znát *činitel plnění vinutí*, protože právě pro co nejpřesnější optimalizaci návrhu je znalost tohoto činitele podmínkou. Optimálním návrhem se myslí dosažení minimálního celkového objemu mědi a feromagnetika s ohledem na obě kritéria minimalizace, viz dělení v kapitole 5.1.[4] V zásadě dnes používáme lakované vodiče, díky nimž můžeme jednotlivé závity vinout přímo vedle sebe, čímž dokážeme dobře využít celý prostor cívky.[5]

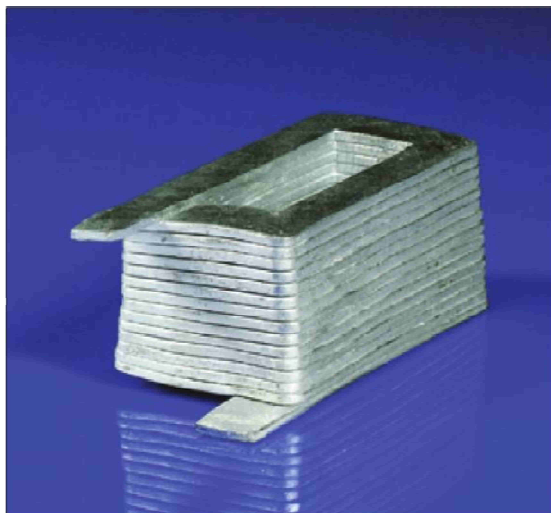
Po konstrukční stránce dělíme vinutí cívek na:

- Vinutí v jedné vrstvě
 - Válcové vinutí
 - Bifilární vinutí
 - Prstencové vinutí
- Vinutí ve více vrstvách
 - Válcové vinutí
 - Bifilární vinutí
 - Deskové vinutí
 - Ploché spirálové vinutí
 - Pyramidové vinutí
 - Křížové vinutí
 - Prstencové vinutí

Díky přísným požadavkům na vinutí se v posledních letech vyvinul nový výrobní postup založený na odlévání. Díky tomuto postupu lze vyrábět vinutí s větší účinností a lepším odvodem tepla. Cívky vyrobené tímto postupem - *odlévané cívky*, viz obrázek 2.2 mají oproti cívkám vinutým z drátu hned několik výhod.[5]

- Větší činitel plnění drážek (do 90 %)
- Nižší elektrický odpor
- Nižší tepelné ztráty způsobené průtokem proudu (až o 50 %)
- Zlepšené tepelné chování
- Minimalizace skinefektu
- Zvýšení proudové hustoty (až trojnásobné)

Díky těmto výhodám lze zajistit úspornost stavebního prostoru a zmenšení hmotnosti. Při použití *Al* bude horší elektrická vodivost vykompenzována větším činitelem plnění drážky, přičemž hmotnost se zmenší asi o 50 % a materiálové náklady o 85 %. Pochopitelně je nezbytné následně vinutí opatřit vrstvou izolace.[5]



Obr. 2.2: Hliníková cívka vyrobená technologií přesného lití [5]

2.2.3 Maximální proud

Maximální dovolený proud je jedním z dalších důležitých parametrů cívky. Máme-li vzduchovou cívku, pak hodnota maximálního dovoleného proudu je jednoznačně omezena maximálním dovoleným oteplením vodiče cívky v ustáleném režimu. Při periodickém napájení je hodnota nejvyššího dovoleného proudu vyjádřena jako jeho efektivní hodnota.[1]

Pro cívku s feromagnetickým jádrem platí, že maximální dovolený proud I_{max} je omezený oblastí přesycení feromagnetického materiálu použitého jádra, kde oblast přesycení je dána hodnotou B_{max} . [4]

Právě v oblasti přesycení jádra dochází k prudkému poklesu diferenciální permeability a tím pádem i hodnoty diferenciální indukčnosti. Nebezpečí přesycení se eliminuje tím, že jádru narušíme jeho homogenitu (stejnorodost) pomocí úzké vzduchové mezery, tím ovšem zase snížíme indukčnost induktoru.[1]

Dalšími požadavky na cívky jsou:

- Maximální zatížení
- Geometrické vlastnosti
- Žádaná hodnota indukčnosti
- Nastavitelnost indukčnosti
- Mechanická a klimatická odolnost
- Provozní odolnost
- Životnost

2.3 Druhy cívek

Druhy cívek dělíme dle:

- Způsobu vinutí:
 - Cívka vinutá na válcové kostře:
 - * Solenoid
 - Cívka vinutá na feritovém jádře:
 - * Toroid,
 - * přesytky,
 - * laděné cívky,
 - * odrušovací prvky,
 - * cívky spínacích zdrojů,
 - * cívky TV,
 - * magnetické hlavy,
 - * a další.
 - Cívka odlévaná
- Pracovní kmitočtové oblasti:
 - Nízkofrekvenční cívka
 - Středofrekvenční cívka
 - Vysokofrekvenční cívka

2.3.1 Vzduchová cívka

Vzduchová cívka má zpravidla jednodušší konstrukční provedení než induktor, neboť se jedná o cívky zpravidla větších rozměrů bez magnetického obvodu. Skutečnost, že v tomto případě není použitý magnetický obvod, znesnadňuje následnou výrobu vzduchové cívky s přesnou hodnotou indukčnosti L . Dalším negativem je v tomto případě i skutečnost, že v porovnání s induktorem má vzduchová cívka proměnlivou indukčnost v širokém rozmezí kmitočtů, teplot i klimatických vlivů.[6]

2.3.2 Induktor

Jedná se o základní pasivní dvojpól, který reprezentuje část obvodu, ve kterém se při průtoku elektrického proudu akumuluje část energie ve formě magnetického pole. Prvek si lze představit jakožto ideální indukční cívku, která má chování popsané vztahem proudu i a cívkovým magnetickým tokem Φ_c . Cívkový magnetický tok je de facto popsán jako

suma všech dílčích magnetických toků procházejících jednotlivými závity cívky, viz rovnice 6.3.[1]

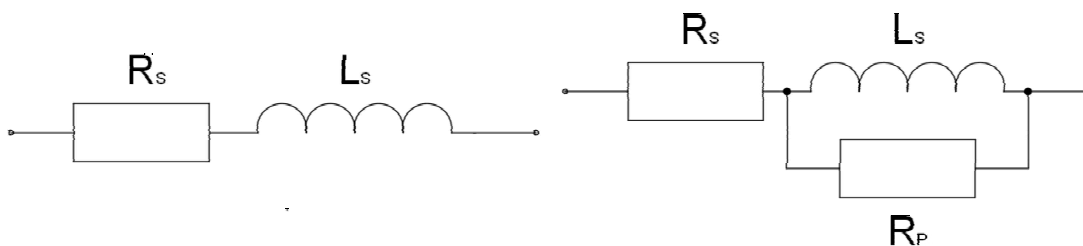
$$\Phi_c = f(i); (i = g(\Phi_c)) \quad (2.6)$$

$$\Phi_c = \sum_{k=1}^N \Phi_k \quad (2.7)$$

2.3.3 Náhradní schéma cívky

Z náhradního schématu (Obr.2.2) je patrné, že induktor je reprezentován indukčností (zjištěna při nízkém kmitočtu) a odporem. Vodič, který tvoří vinutí, se vždy vyznačuje nenulovým odporem R_s (stejnoseměrný obvod vinutí). Hodnota tohoto odporu je navyšována o přídatné ztráty vznikající průchodem proudu obvodem. Tyto ztráty lze považovat za celek skládající se z následujících částí:

1. tepelné ztráty elektrické energie vznikající při průchodu proudu vinutím,
2. ztráty způsobené povrchovým jevem,
3. ztráty způsobené magnetickým působením sousedních závitů vinutí cívky, které se s kmitočtem zvětšují.



Obr. 2.3: Zjednodušené náhradní schéma induktoru (překresleno z [1])

Obr. 2.4: Konečné náhradní schéma induktoru (překresleno z [1])

Výše uvedené druhy ztrát jsou kmitočtově závislé a hodnotu odporu navyšují. Tato skutečnost je poté v náhradním schématu vyjádřena jako sériové spojení indukčnosti L_s a odporu R_L reprezentující ztráty.

Uvažujme nyní stejný systém zapojení, ovšem odpor R_s považujeme za nulový a cívku vložíme do feromagnetického jádra. Nyní uvažovaný induktor má oproti vzduchové cívce jádro definované hysterezní křivkou.

Hysterezní křivka je dána plochou, která představuje ztráty v cívce potřebné na opakované přemagnetování jádra za jednu periodu napájecího napětí, resp. proudu. Jinými slovy vlivem střídavého proudu procházejícího induktorem dochází k opakovanému jevu přemagnetování, což znamená, že v jednom okamžiku energii akumulujeme a v dalším

okamžiku energie dodáváme zpět do zdroje. Protože ovšem dochází v cívce ke ztrátám, energie akumulovaná není shodná s energií zpětně do zdroje dodanou. Výsledkem je tedy rozdíl energií, který je roven ztrátové hysterezní energii. Velikost této ztrátové energie je pak rovna ploše hysterezní smyčky. Proto je nutné v nejjednodušším případě k předchozímu vyjádření počítat s odporem R_p , který je připojený k induktoru paralelně (Obr.2.3).

3

Tlumivka

Definice tlumivky podle normy ČSN EN 615558-1 je následující: Tlumivkou se rozumí sestava obsahující jedno nebo více vinutí s impedancí $Z[\Omega]$ závisující na frekvenci $f[Hz]$, která pracuje na principu samoindukce, pomocí níž magnetizační proud vytváří magnetické pole napříč magneticky činným jádrem nebo vzduchem.[3]

Tlumivka slouží ve střídavých obvodech k omezení a řízení proudu a její rozsah použití se vyskytuje v nejrůznějších spektrech silnoproudé či výkonové elektrotechniky, ať už v elektrických obvodech pohonů, tak i v aplikacích distribuční a přenosové soustavy. Charakteristickou vlastností tlumivky je použití, kdy tlumivka slouží ke kompenzaci účinníku $\cos\varphi$, viz stránka 15.

Neboť existuje široké spektrum tlumivek, dělení se provádí podle níže uvedených pravidel:

- **Dělení podle aplikace tlumivek**
- **Dělení dle konstrukčního uspořádání:**
 - Chladícího a izolačního média
 - Typu magnetického obvodu
 - Provozního prostředí

3.1 Rozdělení tlumivek dle konstrukčního uspořádání

Tlumivky mohou mít různá konstrukční uspořádání, která de facto plynou z požadavků na jejich funkci a aplikaci. Právě konstrukční uspořádání musí být v souladu s konkrétními podmínkami a rozměry tak, aby vyhovovala oblasti provozu. Z tohoto důvodu je též kladen důraz i na stupeň ochranného krytí. Lze říct, že základním rysem odlišnosti různých druhů tlumivek je právě konstrukční uspořádání.[7] [8]

3.1.1 Suché a olejové tlumivky

Druhy těchto tlumivek se liší použitým druhem chladicího a izolačního média.

3.1.1.1 Suché tlumivky

Chladícím a izolačním médiem je pro suché tlumivky vzduch. U suchých tlumivek je tedy nutné dodržovat vzdušné vzdálenosti mezi místy s různým potenciálem, případně použít vzduchové kanály tak, aby vzduch mohl bez větších obtíží proudit a odvádět tak teplo z vnitřní struktury vinutí.

3.1.1.2 Olejové tlumivky

Pro tlumivky používané v náročnější výkonových aplikacích (desítky až stovky MVA) je tímto médiem transformátorový olej. Tlumivka je v těchto aplikacích umístěna v olejové nádobě, která má povrch upravený radiátory tak, aby co nejvíce tepla bylo vyzařováno do okolí. Transformátorový olej je de facto elektroizolační olej (kapalina), u kterého nás zajímají parametry jako termo-oxidační stabilita a elektroizolační vlastnost. Pro co nejvyšší účinnost tohoto média používáme olej o nízké viskozitě, neboť požadujeme, aby olej mohl správně vyplňovat prostor a dostávat se do pórů tuhých izolantů. Transformátorový olej lze v určitých aplikacích použít i jako zhášecí médium. V tomto případě je ovšem kladen důraz na vysokou elektrickou pevnost E_p - ta je vysoce náchylná na přítomnost sedimentů (nečistot) a rozpustných kalů. Vyšší obsah sedimentů snižuje přeskokovou vzdálenost a tím pádem elektrickou pevnost, stejně tak vyšší obsah rozpustných kalů dokáže svými hygroskopickými vlastnostmi vázat vodu na olej, a tím negativně ovlivňovat vlastnosti tohoto média.[9] [11]

3.1.2 Rozdělení tlumivek podle typu magnetického obvodu

Zásadním rozdílem pro tlumivky s různým magnetickým obvodem je chování jejich magnetizační charakteristiky. Magnetizační charakteristika je buď lineární pro tlumivku bez feromagnetického jádra, nebo nelineární pro tlumivku s feromagnetickým jádrem či stíněním.[3]

3.1.2.1 Tlumivky s feromagnetickým obvodem

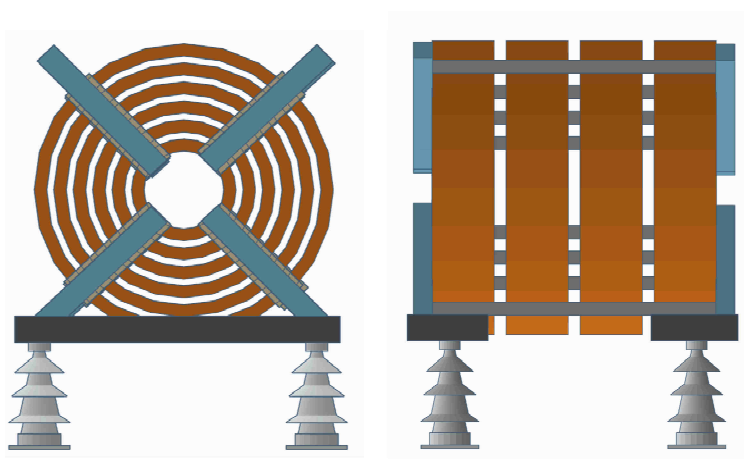
Feromagnetický obvod nám u cívky zesiluje vyvolané magnetické pole. Taková tlumivka se ovšem považuje za nelineární tlumivku, neboť feromagnetický materiál, na rozdíl od vzduchu, má nelineární magnetizační charakteristiku (charakteristika B-H). V nelineárním magnetickém obvodu neplatí přímá úměra mezi spřaženým tokem Ψ a proudem I . Tím pádem se indukčnost v závislosti na proudu mění. To je hlavní rozdíl od cívky vzduchové.[9] Při návrhu tlumivky je nutné brát v potaz oblast přesycení jádra B_{max} , ve které dochází k prudkému poklesu tzv. diferenciální permeability, a tím pádem k poklesu diferenciální

indukčnosti. Z tohoto důvodu se u tlumivek s feromagnetickým jádrem zavádí pojem vzduchová mezera. Tato mezera vnese do magnetického obvodu určitou nehomogenitu, a tím pádem snižuje oblast tzv. přesycení jádra. Nevýhodou aplikace je snížení indukčnosti L tlumivky.[1]

3.1.2.2 Tlumivky bez feromagnetického obvodu

Jak již bylo uvedeno dříve, hlavním rozdílem mezi tlumivkou bez feromagnetického obvodu a tlumivkou s feromagnetickým obvodem je rozdílná magnetizační křivka. Jestliže tlumivka s feromagnetickým obvodem je nazývána jako nelineární tlumivka, tak tlumivka bez feromagnetického obvodu je nazývána jako tlumivka lineární. Důvodem je to, že vzduchová tlumivka se vyznačuje linearitou ve všech provozních stavech, díky lineární magnetizační charakteristice vzduchu. To znamená, že platí lineární závislost mezi proudem a magnetickým tokem v celém proudovém rozsahu. Tím pádem je indukčnost L vždy konstantní (vyhlazovací tlumivka viz kapitola refvzhlazovacikapitolatlumivka).[3] [9]

Naopak nevýhodou oproti tlumivkám s feromagnetickým obvodem je jejich silné magnetické pole, které se projevuje v širokém okolí tlumivky. Proto se takový druh tlumivek ne příliš často používá v oblastech, kde je nepřípustné, aby byly ostatní prvky (elektronické, sdělovací přístroje a zařízení) tímto polem ovlivňovány, nehledě na to, že jak již bylo řečeno v kapitole 2.2.1 dochází k jevu, kdy, je-li přítomný feromagnetický materiál vystaven tomuto střídavému poli, vznikají v něm vlivem přesycování hysterezní ztráty a ve vodičích zase dochází ke vzniku ztrát indukovanými vířivými proudy, které mohou v určitých případech vést na vznik závitů spojených nakrátko (mezizávitový zkrat). S ohledem na tyto skutečnosti je nutné dopřát vzduchové tlumivce prostor a v některých případech i speciální stavební úpravy stanice.[9] Ilustrativní případ tlumivky bez feromagnetického obvodu je uveden na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Konstrukce vzduchové tlumivky pro stejnosměrné proudy (překresleno z [9])

3.1.3 Rozdělení podle provozního prostředí

Dělení dle provozního prostředí:

- tlumivka pro venkovní použití,
- tlumivka pro vnitřní použití.

3.1.4 Rozdělení tlumivek z hlediska aplikace

3.1.4.1 Kompenzační tlumivka

Norma tento druh tlumivek definuje jako tlumivky zapojené v různých režimech. Účelem těchto zapojení je důvod kompenzování kapacitního proudu v energetickém systému.[3] Kompenzování takového kapacitního výkonu probíhá dodáváním potřebného množství induktivního jalového výkonu, přičemž trvalého stavu s nulovým jalovým výkonem nelze dlouhodobě dosáhnout, lze se mu pouze přiblížit. Jelikož se jalový výkon skládá ze dvou složek - kapacitní a induktivní, tak kompenzace probíhá vždy mezi dvěma body obsahující reaktanční prvky (kompenzační tlumivka, kompenzační kondenzátor), čímž zbytečně nezatěžujeme celou síť.[8]

V sítích VVN má tento druh tlumivek také funkci prevence vůči havarijním stavům jednotlivých prvků sítě. V zásadě jde o to, že vlivem přítomnosti kladných přírůstků napětí na kapacitorech vzniká na síti tzv. Ferrantiho jev, který se projevuje vyšším napětím na konci vedení. Velikost tohoto napětí se zvyšuje vlivem přechodových dějů až do doby, kdy právě napětí na konci vedení vzroste nad limit izolační pevnosti jednotlivých prvků a dojde k elektrickému průrazu.[8]

Tlumivka se zapojuje v režimech fáze-zem, fáze-nulový bod soustavy a nebo fáze-fáze.[3]

Dělení dle konstrukce a instalace:

- tlumivky 1-fázové nebo 3-fázové,
- tlumivky suché nebo olejové,
- tlumivky s feromagnetickým obvodem nebo bez feromagnetického obvodu,
- tlumivky s magnetickým stíněním nebo bez magnetického stínění,
- tlumivky pro vnitřní instalaci nebo venkovní,
- tlumivky s konstantní nebo proměnnou reaktancí,
- tlumivky lineární nebo nasycené.

Konstrukční uspořádání kompenzačních tlumivek je nejčastěji v olejovém provedení. To znamená, že tlumivka je vsazena do chladicí nádoby a zalita olejem. Konce vinutí jsou vyvedeny skrz průchodky na víko chladicí nádoby. Druh tohoto uspořádání se používá pro tlumivky s výkony 100MVar. Co se týče magnetického obvodu, používá se nejčastěji v jádrovém, či plášťovém uspořádání.

3.1.4.2 Tlumivka pro omezení proudu v síti a mezi nulovým bodem a zemí

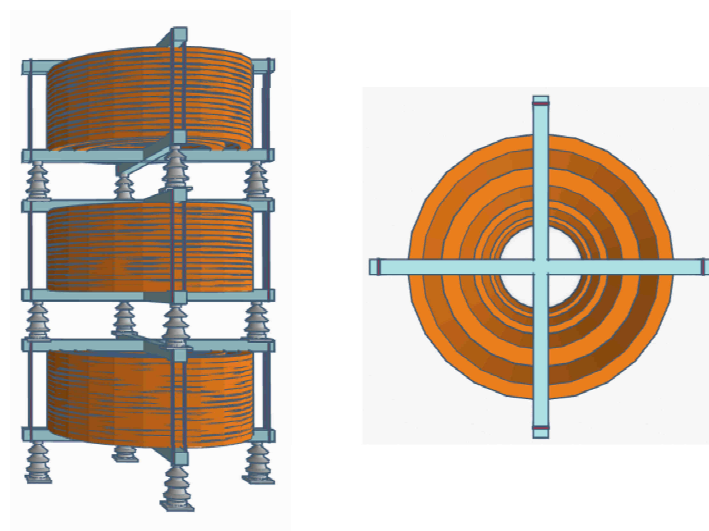
Druhy tlumivek sloužící k omezení proudů při poruchových stavech: *Tlumivka pro omezení proudu v síti* se používá v sériovém zapojení s energetickým systémem a omezuje proud při výše zmíněném poruchovém stavu. *Tlumivka k omezení proudu mezi nulovým bodem a zemí* omezuje fázový proud při zemních spojeních na požadovanou hodnotu a zapojení se provádí mezi nulový bod energetického systému a zem. Ilustrativní případ omezovací tlumivky je uveden na obrázku 3.2.

Druhy tlumivek spadající do této kategorie:

- tlumivky ke zhasení oblouku při jednopólovém spínání vedení,
- tlumivky pro příčné přípojnice zapojené mezi dvě různé sekce přípojníc,
- tlumivky pro příčné přípojnice zapojené mezi energetické systémy k omezení poruchového proudu,
- tlumivky pro obloukové pece pro zvýšení účinnosti tavby kovů a snížení vlivu na energetický systém,
- tlumivky v sérii s usměrňovači, komutační tlumivky,
- diferenciální reaktory,
- tlumivky pro regulaci toku výkonu v sítích,
- tlumivky uzemňující nulový vodič soustavy,
- tlumivky určené k uzemnění nulového bodu alternátoru,
- zkušební tlumivky používané pro nastavení zkušebního proudu na požadovanou hodnotu proudu v elektrických zkušebních obvodech zkratoven,
- tlumivky pro synchronizaci nebo utlumení přechodových dějů ve spínacích zařízeních,
- konvertorové nebo fázové tlumivky zapojené do série s konvertorem napěťového zdroje.

Dělení z hlediska konstrukčního provedení a instalace:

- tlumivky 1-fázové nebo 3-fázové,
- tlumivky suché nebo olejové,
- tlumivky otevřené nebo s jádrem se vzduchovou mezerou,
- tlumivky s magnetickým stíněním nebo bez magnetického stínění,
- tlumivky pro vnitřní instalaci nebo venkovní,
- tlumivky s odbočkami nebo bez odboček,
- tlumivky suchého typu s každou fází montovanou bočně nebo případně ve vertikálním sloupci.



Obr. 3.2: Konstrukce 3-fázové omezovací tlumivky (překresleno z [9])

3.1.4.3 Filtrační, tlumící a vybíjecí tlumivky zapojené s kondenzátory

Tlumící tlumivkou se nazývá tlumivka zapojená do série s kompenzačním kondenzátorem k omezení zapínacího proudu při nabíjení kondenzátoru, k omezení vypínacího proudu při blízkých poruchách nebo při spínání přilehlých kondenzátorů (případně neseřízené skupiny kondenzátorů) za účelem vyloučení rezonance s energetickým systémem. Tlumící tlumivka musí snést všechny možné druhy přetížení, které připadají v úvahu při provozech kondenzátorové baterie. Charakteristickou vlastností těchto tlumivek je nižší hodnota indukčnosti s větším důrazem na odolnost proti napětovému namáhání.[8] [3]

Filtrační tlumivka v sériovém, či paralelním zapojení s kondenzátory se používá za účelem zmenšení (snížení) nebo zamezení (blokování) harmonických složek signálů nebo řídicích signálů s kmitočty do 10kHz. Jinými slovy použití je tedy vhodné pro zajištění

kvality dodávané energie a také pro ochranu před nežádoucím rušením. Vlivem výkonových polovodičových součástek na síť dochází ke vzniku vyšších harmonických složek, které vyvolávají úbytky napětí na síti, a tím pádem může docházet k ovlivňování připojených spotřebičů. Z tohoto důvodu se filtrační tlumivka ladí na jednotlivé frekvence harmonických složek a tlumí je. Kondenzátor v tomto filtru zároveň slouží jako zdroj kapacitního výkonu, který kompenzuje induktivní zátěž, a tím pádem zlepšuje účinnost $\cos\phi$. [8] [3]

Vybíjecí tlumivka, jak už z názvu vyplývá, je druh tlumivky používané pro omezení proudu při poruchových stavech. Tlumivky tohoto typu se používají z pravidla v obtokovém (*bypass*) nebo případně vybíjecím obvodu skupin výkonových VN sériových kondenzátorů.

Stojí za to zmínit, že tlumivky této kategorie jsou dimenzovány na vysoké krátkodobé proudy vznikající při spínacích a poruchových stavech. Z tohoto důvodu je důležité mít na paměti, že tlumivka musí snést i poruchové proudy vznikající při zkratech na kondenzátoru. Tlumivky této kategorie jsou v zásadě vždy suchého typu se vzduchovým jádrem. Konstrukční provedení jsou následující.

Dělení skupiny tlumivek z hlediska konstrukčního provedení:

- tlumivky 1-fázové nebo 3-fázové,
- tlumivky pro vnitřní instalaci nebo venkovní,
- tlumivky s odbočkami nebo bez odboček,
- tlumivky s jednotlivými fázemi montovanými vedle sebe nebo ve svislém sloupci.

3.1.4.4 Zemní transformátory - tvořiče nulového bodu sítě

Zemním transformátorem se myslí trojfázový transformátor, nebo v opačném případě tlumivka, která má za úkol skrze impedanci (případně i zhášecí tlumivku) zajistit spojení nulového bodu energetického systému se zemí, a tím pádem přenést proud při nesouměrném zatížení (případně zkratu) soustavy, přičemž způsob takového spojení se zemí může být proveden:

- přímo,
- prostřednictvím tlumivky sloužící k omezení proudu,
- prostřednictvím odporu,
- prostřednictvím zhášecí tlumivky.

Konstrukční provedení této skupiny je primárně konstruováno na vnitřní i venkovní instalaci, přičemž obvykle se zemní transformátor v 3-fázovém provedení nachází v ponořené kapalině s přirozeným chlazením. Jediným rozdílem v konstrukci je v zásadě typ provedení hlavního vinutí:

- hlavní vinutí zapojené do lomené hvězdy,
- hlavní vinutí připojené do hvězdy se stabilizačním vinutím zapojeným do trojúhelníku.
 - Toto vinutí může být v rozpojeném stavu z toho důvodu, aby se připojením interního nebo externího odporu (popřípadě tlumivky) docílilo naladění impedance nulové složky Z_0 .

3.1.4.5 Zhášecí tlumivky

V zásadě se jedná o jednofázový typ tlumivek, které má význam použít v obvodech, kde je potřeba kompenzovat kapacitní proudy I_c , které se objevují při jednofázových zemních poruchách v energetických systémech. Zapojení se provádí mezi nulovým bodem výkonového transformátoru a zemí trojfázového energetického systému, popřípadě mezi zemním transformátorem a zemí trojfázového energetického systému. Je ověřeno, že pro zapálení a udržení oblouku je zapotřebí, aby zemní proud přesáhl hodnotu 8-10A. Zhášecí tlumivka musí být tedy schopna držet velikost proudu I_c pod touto hraniční hodnotou. De facto se jedná o tlumivku s vysokou hodnotou impedance.

Z hlediska konstrukce se jedná o tlumivky ponořené v nádobě s kapalinou a přirozeným chlazením, přičemž provedení je přizpůsobeno použití jak ve venkovním, tak i ve vnitřním prostředí. Za zmínku stojí, že se jedná o tlumivku s předepsanou linearitou indukčnosti s tolerancí $\pm 5\%$. Tato indukčnost je obvykle nastavitelná ve stupních, nebo ve spojitěm rozsahu proto, aby byla rezonančně vyladěná s kapacitou sítě. Nastavování indukčnosti se provádí změnou vzduchové mezery, přičemž změna mezery se provádí pomocí pohonu s regulátorem, tak aby impedance tlumivky byla neustále přizpůsobována parametrům obvodu. Každá tlumivka tohoto typu musí obsahovat tzv. pomocné vinutí určené k měření a také sekundární vinutí, aby bylo možné připojit zatěžovací odpor. Tento odpor zvýší odporovou složku proudu zemního spojení tak, aby došlo k zlepšení provozní spolehlivosti ochrany proti zemnímu spojení.[3]

3.1.4.6 Vyhlazovací tlumivky

Vyhlazovací tlumivky nachází uplatnění při sériovém zapojení ve stejnosměrných systémech za účelem zajištění vysoké impedance k toku harmonických proudů a taktéž k omezení proudů při poruchách ve stejnosměrných systémech. Druh této tlumivky snižuje zvlnění elektrického proudu ve stejnosměrných obvodech. Výkonové pohony se stejnosměrným motorem vyvolávají vyšší harmonické složky zvýšené ztráty a vznik parazitních

pulzačních momentů elektromotoru, které jsou jevem vedoucím na vznik vibrací, které jsou pro jeho provoz nežádoucí. Z tohoto důvodu se vyhlazovací tlumivky používají v měničnách pro stejnosměrnou trakci. Další oblastí použití je obloukové svařování stejnosměrným proudem a také při galvanickém pokovování.[8]

Příklad suché vyhlazovací tlumivky je uveden na obrázku 4.2. Hlavní použití dle normy [3] určují tyto oblasti:

- Průmyslová aplikace, kde sítě mají obvykle obrovské superponované harmonické složky. Konstrukce těchto tlumivek pro vnitřní instalace a napětí ss systémů nepřesahující hodnoty 10 kV.
- Vysokonapěťové stejnosměrné přenosy. Stejnosměrné systémy s obvykle malými superponovanými harmonickými komponenty. Stejnosměrné systémy s obecně vyšším napětím než 50kV.

Dělení z hlediska konstrukčního provedení:

- tlumivky suché, nebo ponořené do kapaliny,
- tlumivky se vzduchovou mezerou, nebo se vzduchovým jádrem,
- tlumivky s nebo bez magnetického stínění,
- tlumivky pro vnitřní instalaci nebo venkovní,
- tlumivky s rozdílným typem chlazení (přirozené, nucené vzduchové nebo přímé kapalinové),
- tlumivky s konstantní indukčností, nebo s indukčností proměnnou na proud.

3.1.5 Rozdělení tlumivek podle typu magnetického obvodu

3.1.5.1 Tlumivky s feromagnetickým obvodem

Tlumivky s feromagnetickým obvodem jsou takové tlumivky, jejichž magnetický tok Φ se uzavírá převážně magnetickým obvodem z feromagnetického materiálu. Tento magnetický obvod může být v různých aplikacích přerušován úzkou nemagnetickou mezerou, která tvoří v tomto obvodu určitou nehomogenitu. Výše uvedená mezera příznivě ovlivňuje oblast tzv. přesycení jádra, při kterém dochází k prudkému poklesu diferenciální permeability, a tím pádem i hodnoty diferenciální indukčnosti (viz. 2.2.3).[1]

Oproti vzduchové cívce má tu výhodu, že ji lze konstruovat na menší rozměry, nevýhodou je naopak její ampérweberová charakteristika, protože se chová lineárně jen do určité oblasti magnetické indukce B .

3.1.5.2 Tlumivky bez feromagnetického obvodu

Tlumivkou bez feromagnetického obvodu, tedy železného jádra sloužící k omezení proudu, nazýváme reaktorem. Reaktor má magnetický obvod tvořený nemagnetickými hmotami (vzduch, olej).

Oproti tlumivce s feromagnetickým obvodem má tu výhodu, že má lineární magnetizační charakteristiku, neboť vzduch je v tomto ohledu "magnetickým obvodem" s ideální lineární magnetizační charakteristikou. Naopak nevýhodou oproti tlumivkám s feromagnetickým obvodem je jejich silné magnetické pole, které se projevuje v širokém okolí tlumivky. Proto se takový druh tlumivek ne příliš často používá v oblastech, kde je nepřijatelné, aby byly ostatní prvky (elektronické, sdělovací přístroje a zařízení) tímto polem ovlivňovány, nehledě na to, že jak již bylo řečeno v kapitole 2.2.1 dochází k jevu, kdy, je-li přítomný feromagnetický materiál vystaven tomuto střídavému poli, vznikají v něm vlivem přesycování hysterezní ztráty a ve vodičích zase dochází ke vzniku ztrát indukovanými vířivými proudy, které mohou v určitých případech vést na vznik závitů spojených nakrátko. S ohledem na tyto skutečnosti je nutné dopřát vzduchové tlumivce prostor a v některých případech i speciální stavební úpravy stanice.

4

Magnetický obvod tlumivek

4.1 Magnetický obvod tlumivek

Magnetické obvody obecně třídíme podle jejich amperweberové charakteristiky, to znamená podle toho, jak se jeví funkční závislost spřaženého toku na proudu. Tato problematika se již probírala v kapitole 2.3.2. Magnetické obvody mohou být ještě tříděny dle toho, zda jsou:

- obyčejné,
- parametrické,

kde parametrickým obvodem máme na mysli obvod, kde tok Φ není závislý jen a pouze na proudu, ale též na velikosti vzduchové mezery l_v , teplotě, atd. [4]

Magnetický obvod tlumivek i transformátorů tvoří magnetické materiály, přičemž nejpočetnější skupinu tvoří tzv. feromagnetické materiály. Tyto feromagnetické materiály mají nelineární průběh magnetizační charakteristiky (tj. závislost $B=B(H)$) a mimo jiné i svoji hysterezi. Obecně jejich chování popisuje relativní permeabilita μ_r . Podle relativní permeability poté řadíme jednotlivé materiály do skupin magneticky měkkých a magneticky tvrdých materiálů. Samotná permeabilita je nelineární a k jejímu strmému poklesu dochází při překročení tzv. Curieovy teploty, naopak k monotónnímu poklesu permeability dochází při překročení mezního kmitočtu. [4]

Magnetické obvody dále také dělíme podle tvaru. Při použití plechových svazků, lze magnetický obvod tlumivek dělit na obvody s odstupňovaným, nebo naopak neodstupňovaným průřezem. Odstupňované průřezy se zpravidla týkají tlumivek, které jsou navinuty na kruhovou kostru. To znamená, že se musí prostor kostry vyplnit zevnitř plechy s určitým krokem (v tomto případě s odstupem). Aby se takový prostor vyplnil, musí se použít velké množství plechů s různými rozměry, což by bylo časově neefektivní. Proto se v praxi používají jádra s pátým stupněm kroku, což stačí. Příčinou používání kruhových koster je důvod nejkratší délky závitu, což je výhodné hlavně z hlediska úspory mědi.[4]

Z hlediska magnetických vlastností materiálů lze magnetické materiály dělit do následujících skupin:

- diamagnetika,
- paramagnetika,
- feromagnetika,
- antiferomagnetika,
- feromagnetika,
- ferity,
- magneticky tvrdé slitiny kovů,
- magneticky tvrdé slitiny ze vzácných kovů.

4.1.1 Feromagnetika

Relativní permeabilita feromagnetické skupiny látek bývá v řádech cca. $10^3 - 10^6$, jejich magnetizační charakteristika je nelineární a spolu s jejich hysterezí se jedná o jejich významnou vlastnost. Samotná hystereze je spojena se ztrátami, které vznikají při přeuspořádání domén v momentě, kdy dochází k magnetizaci vnějším polem. Tyto domény zanikají při překročení Curieovy teploty a zanikají velice náhle, z tohoto důvodu se i strmě mění hodnota relativní permeability.[4]

4.1.2 Ferity

Jedná se o jádra různých tvarů, které se skládají ze dvou segmentů přilepených proti sobě. Jedno jádro z dvojice má středový sloupek mírně zbroušený tak, aby bylo možné ladit výslednou indukčnost. Pokud nejsou jádra lepená, tak je lze k sobě ukotvit pomocí sponek nebo stahovacího šroubu. Je důležité aby na sebe oba protikusy doléhaly a byli vůči sobě přesně vycentrovány, dbát se dále musí i na vrstvu fixačního lepidla (vrstva by neměla být příliš vysoká). Seběmenší odchylky ovlivňují indukčnost, pokud tedy není jádro laditelné. Účel použití těchto jader je ve VF technice. Tvary jader jsou následující:

- E jádra,
- EC jádra,
- PM jádra,
- X jádra,
- Hrníčková jádra,
- CC jádra,

- ETD jádra,
- EP jádra
- Q jádra a další.

4.2 Vinutí tlumivky

Toto téma bylo částečně řešeno v kapitole 5.1, v návaznosti na tuto kapitolu je třeba zmínit, že u tlumivek se nemusí řešit, zda bude vinutí dělené nebo jednoduché, protože u tlumivek máme pouze jedno vinutí (oproti transformátorům), v tomto případě je nejčastěji vinutí jednoduché a zpravidla souosé. Z konstrukčního hlediska je nutné dodržovat vzdušné i povrchové izolační vzdálenosti mezi vinutím a živými částmi tlumivek (magnetický obvod tlumivky). Nároky na tyto vzdálenosti podrobněji popisuje norma *ČSN EN 61558-1 Bezpečnost výkonových transformátorů, napájecích zdrojů, tlumivek a podobných výrobků*.

Základním prvkem každého vinutí je závit, cívka či deska. Závit se skládá z jednoho, nebo několika (v případě použití paralelního vodiče) vedle sebe umístěných a navzájem elektricky izolovaných vodičů. Tvoří-li závity zapojené v sérii jeden celek, pak se tento celek nazývá cívkou. Má-li každý ze závitů stejný směr osy vinutí, tak tyto závity tvoří vrstvu vinutí.[7]

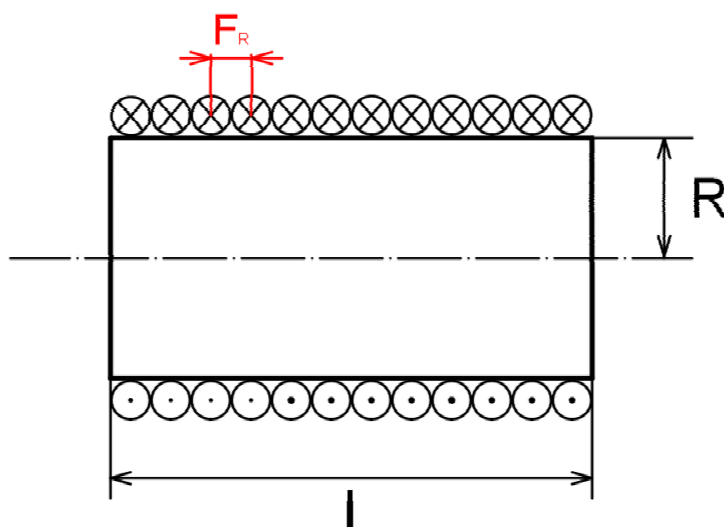
Vstupní vinutí tlumivek tvoří tzv. vstupní obvod. Tento vstupní obvod musí splňovat určité náležitosti, tak aby tlumivka plnila správnou funkci při provozu. Náležitosti pro správnou funkci tlumivky jsou uvedeny v následující podkapitole 4.2.1.

4.2.1 Základní požadavky

Mechanická pevnost je určujícím parametrem pro odolnost na mechanické namáhání vinutí při výrobě a hlavně při průchodu proudem závity. Při velkém proudu, který prochází vstupním vinutím, působí na jednotlivé vodiče elektrodynamické síly, které jsou závislé na následujících proměnných:

1. velikostí proudu procházející vinutím,
2. délkou vodiče(vinutí),
3. vzdáleností mezi vodiči.

Na níže uvedeném odvození (které bylo řešeno na předmětu základy elektroinženýrství s doc. Ing. Bohumilem Skalou, Ph.D.) pro obrázek 4.1 je naznačeno, jakým způsobem se chová vinutí, jímž prochází elektrický proud. Z odvození (rovnice: 4.1-4.8) je patrné, že na sousední vodiče působí při průchodu proudu ve shodném směru přitažlivá síla, která může narušit izolaci jednotlivých závitů a tím pádem může vést ke vzniku mezizávitových zkratů, což je nežádoucí stav. Z tohoto důvodu by se každé vinutí mělo vakuově impregnovat (pokud není možné, tak alespoň máčet v laku). Tímto procesem docílíme zvýšení mechanických i izolačních vlastností vinutí. Cílem celého odvození je určit, jak velká síla působí na protékané vodiče proudem. Abychom tuto sílu určili, vycházíme ze vztahu pro energetickou vlastní indukčnost, protože se statickou a dynamickou indukčností si v aplikacích s vodiči nezanedbatelných průřezů nevystačíme. Proud procházející závity vytváří energii magnetického pole, která má dvě složky (podle toho s jakým počtem smyček počítáme). Výsledným účinkem této energie je síla působící na závity, přičemž její velikost je větší, čím větší bude vzdálenost v radiálním směru mezi vodiči.[2]



Obr. 4.1: Síla působící na závity solenoidu

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (4.1)$$

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot R^2}{l} \quad (4.2)$$

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (4.3)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot I \quad (4.4)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (4.5)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot R^2}{l^2} \cdot I^2 \quad (4.6)$$

$$F_a = \frac{\partial w}{\partial l} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot R^2}{l^2} \cdot I^2 \quad (4.7)$$

$$F_r = \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot R^2}{l} \cdot I^2 \quad (4.8)$$

Elektrická pevnost: Elektrická pevnost určuje požadavky na systém elektrické izolace. Izolace musí být schopna vydržet bez poškození (elektrického průrazu) při dlouhodobém namáhání střídavým elektrickým polem při jmenovitých podmínkách provozu. Stejně tak musí být schopna odolat krátkodobým rázovým hodnotám přepětí. Oproti transformátoru má tlumivka tu výhodu, že musí vyhovět pouze zkoušce elektrické pevnost mezi vinutím a živou částí. Veškeré zkoušky pro elektrickou pevnost izolace popisuje norma.[12]

Technologická proveditelnost: Možnosti konstrukce vinutí jsou velmi rozmanité, nicméně občas nelze v některých závodech všechny druhy vinutí realizovat. Proto je nutné se zamýšlet i nad *technologickou proveditelností*, která je jedním z požadavků.

Odolnost vůči tepelnému namáhání: Konstrukce by měla zaručovat co možná nejlepší odvod tepla z vnitřních vrstev vinutí. Průchodem střídavého proudu dochází k

oteplování vodičů, a proto je nutné dodržovat, aby teplota izolace nepřekročila svoji třídu, neboť právě oteplení je hlavním faktorem omezující provoz tlumivky. Čím vyšší bude teplota vinutí, tím dříve bude probíhat proces stárnutí izolace a tím pádem i degradace jeho izolačních vlastností. Kupříkladu při zvýšení teploty o 8 °C dochází ke zkrácení doby životnosti izolačního materiálu o polovinu. [7] V tabulce 4.1 jsou uvedeny jednotlivé třídy, podle nichž se provádí klasifikace izolačních materiálů. Teplotní klasifikaci elektroizolačních materiálů popisuje norma ČSN EN 60085: „Elektrická izolace-Teplotní klasifikace”.

Materiály, které prudce hoří, jako např. celuloid, se pro konstrukci nesmějí používat. Bavlna, hedvábí, papír a podobné vláknité materiály se jako izolace smějí používat, ale pouze v těch případech, kdy jsou impregnovány. [10] Impregnovaným materiálem se myslí materiál, u kterého jsou mezery mezi vlákny materiálu zaplněny vhodným izolujícím povlakem (epoxidová pryskyřice, lak, atd.). [12]

Velice používaným elektroizolačním materiálem pro netočivé stroje je materiál pod obchodním označením *Nomex*®), což je ve své podstatě syntetický materiál vyrobený z krátkých vláken a malých vláknitých částic aromatického polyamidu. Přednostmi tohoto elektroizolačního materiálu je velmi dobrá teplotní odolnost. Vydrží i teploty do 220 °C. Dalšími přednostmi je vysoká pevnost v tahu, nehořlavost, samozhášivost, odolnost vůči rozpouštědlům a z elektroizolačního hlediska má velmi vysokou hodnotu elektrické pevnosti $E_P = 40kV/mm$. [10]

Nomex® má navíc dobrou snášenlivost s ostatními druhy laků, pryskyřic i s minerálními nebo syntetickými oleji. Díky tomu ho lze používat u tlumivek v suchém provedení nebo v provedení s olejovou náplní. [10]

Tab. 4.1: Teplotní klasifikace izolantu [10]

RTE[°C]	Teplotní třída	Předchozí označení
<90	70	
>90-105	90	Y
>105-120	105	A
>120-130	120	E
>130-155	130	B
>155-180	155	F
>180-220	180	H
>200-220	200	
>220-250	220	
>250	250	

Provozní náklady souvisí s velikostí ztrát ve vinutí (souvislost s technologickou proveditelností). Jsou tím menší, čím menší jsou ztráty.

4.2.2 Konstrukce vinutí

Hlavní veličinou, jež ovlivňuje druh konstrukce vinutí, je jmenovitý proud tlumivky I_N . Z této hodnoty totiž vycházíme při návrhu průřezu S vodiče a případně i počtu paralelních cívek vinutí. Jestliže se jedná o tlumivku v suchém provedení nebo v olejovém prostředí, tak volíme rozdílnou dovolenou proudovou hustotu $\sigma[A/m^2]$. Jelikož při použití oleje, jakožto chladicího a izolačního média, dochází k lepšímu odvodu tepla, tak si můžeme dovolit počítat při návrhu s vyšším jmenovitým proudem I_N . Proudová hustota následně určuje, jaký druh vodiče použijeme, neboť můžeme použít buď klasicky známý kruhový průřez vodiče, obdélníkový průřez vodiče, nebo v některých aplikacích i fóliové vinutí.[4] [7]

Tab. 4.2: Používané řady průřezů vodičů[7]

Dostupné průřezy vodičů používaných pro vinutí	
kruhový vodič	$0,02 \div 10mm^2$
čtyřhranný vodič	$6 \div 80mm^2$
Maximální hodnota proudu bez nutnosti použití paralelní větve vodiče	
kruhový vodič se suchým provedením tlumivky	25A
kruhový vodič v provedení s olejovou náplní	45A
pravoúhlý vodič se suchým provedením tlumivky	200A
pravoúhlý vodič v provedení s olejovou náplní	360A

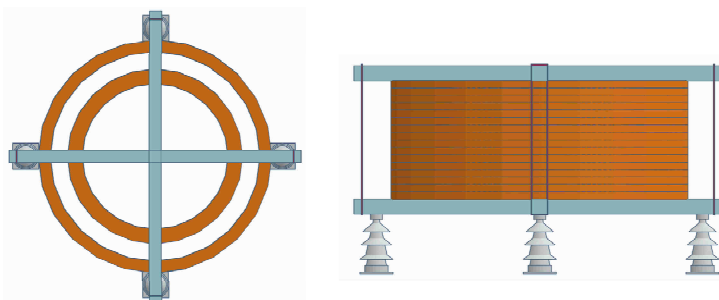
Z konstrukčního hlediska je rozdělení souosých vinutí následující:

Jednovrstvé a dvouvrstvé vinutí: Vinutí tohoto charakteru mohou být navinuta s vrstvami se stejným, ale i s opačným směrem vinutí. Mezi hlavní výhody patří snadnost provedení, ovšem nevýhodou je, že vinutí tohoto typu je mechanicky málo odolné vůči osovým silám vznikajícím při zkratových proudech. Tato nízká míra odolnosti je způsobena jejich radiálními rozměry, z tohoto důvodu se tento druh vinutí používá do jmenovitých proudů 800 A a může mít až čtyři paralelní vodiče.[7] Názorná ukázka určitých druhů vinutí na obrázku 4.3.

Jednovrstvé a dvouvrstvé vinutí s větším počtem paralelních vodičů: Použitím čtyřhranných vodičů s více paralelními vodiči uložených ve šroubovici získáváme nový druh vinutí. Pro rovnoměrné rozložení proudu se provádí tzv. *transpozice vinutí*, při které se prostřídají jednotlivé vodiče všemi polohami ve stejných délkových úsecích (princip transpozice vedení se používá i v přenosové soustavě), to má mimochodem i význam v tom smyslu, že při použití tenčích drátů (paralelních a transponovaných), se snižují ztráty způsobené skinefektem [9]. Předností vinutí tohoto typu je silná mechanická pevnost (značné radiální rozměry). Používají se zpravidla u vinutí nižšího napětí s proudy vyššími než je 300 A. Počet paralelních větví se pohybuje v rozmezí $4 \div 20$ vodičů. [7]

Jelikož se tento druh vinutí používá při vysokých hodnotách proudu, musí být vodiče

slabších průřezů (alespoň pro střídavé proudy), neboť by u nich docházelo k výše zmíněnému skinefektu. Pro větší výkony se vyhodnotila jako jedna z nejlepších konstrukčních metod ta, ve které jsou samonosné vzduchové cívky staženy bandážemi do hliníkových nosných konstrukčních křížů a hvězdic. Na tyto nosné kříže jsou následně připevněny podpěrné izolátory, které plní funkci oddělení ostatních cívek u vícefázových tlumivek. Výhodou této konstrukce je mimo jiné i to, že nemají příliš velký vliv na přídavné ztráty a ani na indukčnost tlumivky, neboť vířivé proudy vznikající v této konstrukci jsou zanedbatelné. Je ovšem nutné brát zřetel na to, aby tato stahovací konstrukce nikdy nevytvářela závit nakrátko. Příklad tlumivky (kompenzačního typu) této konstrukce je na obrázku 4.2.[9]



Obr. 4.2: Konstrukce 1-fázové vyhlazovací tlumivky (překresleno z [9])

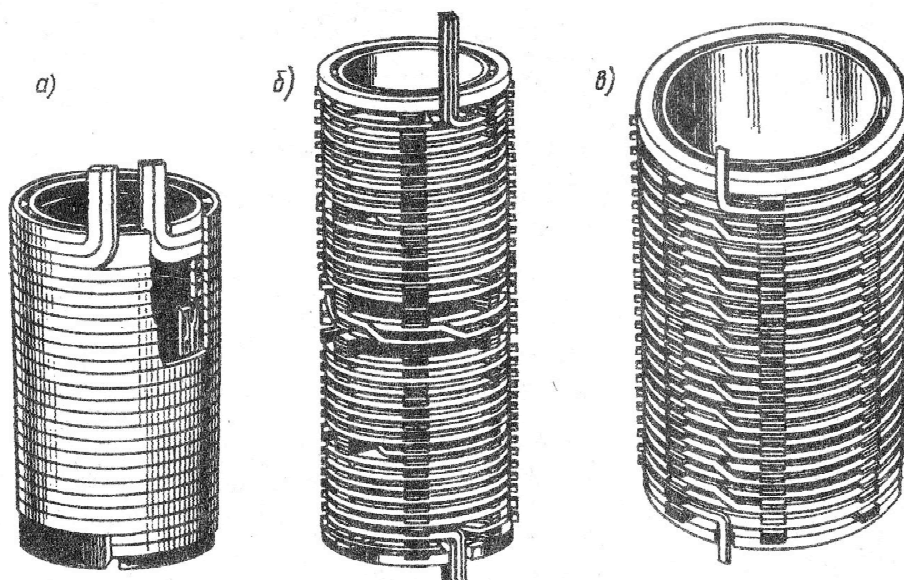
Mnohovrstvová vinutí: Vinutí je z pravidla tvořeno drátem kruhového průřezu, které se umísťuje do celé délky jádra v několika vrstvách. V případech, kdy chceme umístit na sebe více vrstev vinutí, se vytváří tzv. *axiální chladicí kanál*, který zajišťuje odvod tepla z vnitřních oblastí vinutí. Mezi jednotlivé vrstvy se vkládá izolace. Vinutí tohoto typu je jednoduché na konstrukci, ovšem stejně tak jako u vinutí jednovrstvého, či dvouvrstvého se jedná o vinutí s malou mechanickou pevností. Používá se u napětí do 35 kV.[7]

Cívkové mnohovrstvé vinutí: Vinutí se skládá z mnohovrstvých cívek, zapojených v sérii, navinutých z kruhového průřezu, přičemž každá z vrstev je od sebe izolována lepenkou, či papírem. Z hlediska odvodu tepla z vnitřních oblastí vinutí je nutné dodržovat mezi vrstvami chladicí kanály. Oblast použití tohoto vinutí je u vyššího napětí do 35 kV.[7]

4.2.3 Impregnace

Impregnace je proces, při kterém se výrobek obvykle máčí, zaplavuje, nebo zakapává impregnačním lakem. Základem je téměř vždy impregnační lak, který se obvykle liší složením i principem použití. Výrobek se po impregnaci suší, tak aby došlo k vytvrzení impregnantu. To se děje, aby impregnant dostatečně zaplnil mezery mezi vlákny materiálu. Dalším důvodem je zaplnění a fixace vinutí tak, aby nedocházelo k narušení izolace vodičů a následnému vzniku mezi-závitových zkratů (odvození pro obrázek 4.1) při provozu zařízení. Pro příklad lze uvést impregnační lak z *jednosložkové polyesterové pryskyřice*

(bez obsahu styrenu), která má široké spektrum aplikace, tzn. lze v ní máčet za atmosférického tlaku, vakua i tlaku. Druh tohoto elektroizolačního laku má elektrickou pevnost $E_p = 120 \div 150 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ a lze ji vytvrdit za relativně nízkých teplot pro třídy 180(H).[10] Pochopitelně velikou roli hraje i jakost samotného impregnačního laku, protože čím vyšší má viskozitu, tím lepší má schopnost k vyplňování prostorů uvnitř vinutí.



Obr. 4.3: Souosé dvouvrstvé vinutí, vinutí v jedoduché šroubovici, jednovrstvé vinutí [7]

5

Výpočet a návrh tlumivky

V této kapitole je postup řešení návrhu tlumivky na magnetickém jádře typu EI dle zadaných parametrů. Postup je doplněn komentářem o tom, jak jsem postupoval.

5.1 Zadání

Parametry zadané vedoucím bakalářské práce jsou uvedeny v tabulce 5.1. Dle těchto parametrů se postupovalo při samotném výpočtu.

Tab. 5.1: Zadání výpočetní části

Použití tlumivky v obvodu střídavého sinusového proudu	
Indukčnost	$L=3\text{mH}$
Pracovní frekvence tlumivky	$f=400\text{Hz}$
Efektivní hodnota proudu	$I_{ef}=20\text{A}$
Teplotní třída	180(H)
Teplota okolí	40 °C

5.2 Postupný výpočet

V první řadě ještě před výpočtem je nutné určit typ feromagnetika (magnetického jádra). Já jsem zvolil plechy z orientované oceli s nízkým ztrátovým číslem a zároveň užší tloušťkou, protože vyšší tloušťka plechů by mohla nepříznivě ovlivnit ztráty v magnetickém obvodu a tím pádem i výsledné oteplení. Parametry zvoleného feromagnetika jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Permeabilita: Po zvolení feromagnetika je nutné dopočítat permeabilitu použitého materiálu

$$B_{MAX} = \mu \cdot H_{MAX} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_{MAX} \Rightarrow \mu_r = \frac{B_{MAX}}{\mu_0 \cdot H_{MAX}} = 41539 \text{ H/m} \quad (5.1)$$

Tab. 5.2: Parametry pro orientovanou ocel M080-23P

Orientované plechy M080-23P	
Magnetická indukce	$B_{max}=1,4\text{T}$
Intenzita magnetického pole	$H_{max}=26,82 \text{ A/m}$
Činitel plnění železa v jádře	$k_{p,Fe}=0,96$
Permeabilita	$\mu_r=41\ 539 \text{ H/m}$
Pro $B = 1\text{T}$, $f = 50\text{Hz}$	
Δp_{1T}	0,413

Z hodnoty relativní permeability μ_r je patrné, že jsem zvolil ocel, kterou lze zařadit do oblasti magneticky měkkých materiálů.

Volba proudového vodiče: Průřez vodiče se dimenzuje na efektivní hodnotu elektrického proudu I_{ef} . Ve výpočtu se budeme držet doporučené hodnoty proudové hustoty $\sigma = 3\text{A/mm}^2$. Z tabulky 5.3 je vidět, jaký průřez drátu je nutné vybrat pro proudové zatížení $I_{ef} = 20\text{A}$ a současně pro proudovou hustotu $\sigma = 3\text{A/mm}^2$.

Tab. 5.3: Tabulka pro zvolený průřez proudového vodiče

Průměr drátu $d[\text{mm}]$	Průřez drátu $S[\text{mm}^2]$	Proudová hustota $[A/\text{mm}^2]$
3,00	7,06858347057703	3
$I_{ef} = 21,21\text{A}$		

Nyní si pro mnou zvolený proudový vodič určím současnou (korigovanou) proudovou hustotu σ :

$$\sigma = \frac{I_{ef}}{S_{Cu}} = \frac{20}{7,068 \cdot 10^{-6}} = 2829654,78\text{A/m}^2 = 2,829\text{A/mm}^2 \quad (5.2)$$

V nynějším kroku určíme celkový činitel plnění vinutí $k_{p,Cu}$. V publikaci *Magnetické jevy a obvody* autor doporučuje hodnotu pro tlumivky volit v rozsahu 0,5 - 0,75. Já osobně se přikláním k hodnotě 0,5 tak, aby tlumivka měla dostatečně široké vzduchové kanály mezi vinutím a magnetickým obvodem. Co se týče činitele zatížení k_z , je předepsaný elektrickým obvodem, pro který je tlumivka navrhována. V našem případě bude tlumivka v obvodě se střídavým sinusovým proudem, z tohoto důvodu je zatěžovací činitel určen vztahem 5.3

$$k_z = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,71 \quad (5.3)$$

Jádro: V tomto kroku budeme určovat velikost jádra a současně i jeho rozměrové parametry. Velikostí jádra se myslí tzv. *elektromagnetická velikost jádra*, což je součin $S_0 S_j$, viz 5.4

$$S_0 S_j = \frac{I_{max}^2 \cdot k_z}{k_{p,Fe} \cdot k_{p,Cu} \cdot B_{max} \cdot \sigma} = \frac{0,003 \cdot (20 \cdot \sqrt{2})^2 \cdot 0,71}{0,96 \cdot 0,5 \cdot 1,4 \cdot 2,829 \cdot 10^6} = 0,896 \cdot 10^{-6} mm^4 \quad (5.4)$$

Po určené elektromagnetické velikosti jádra musíme v dalším kroku ověřit, zda platí rovnost mezi V_{celk} a $S_0 S_j$. V návrhu počítám s předpokladem, že $S_o = S_j$ - tedy že platí:

$$V_{celk} = S_o \cdot S_j = K_v \cdot (S_o \cdot S_j)^{\frac{3}{4}} = 13,03 \cdot (0,896 \cdot 10^{-6})^{\frac{3}{4}} = 0,000379468 m^3 \quad (5.5)$$

Co se týče velikosti obecné konstanty K_v , tak pro EI plechy je přibližně rovna hodnotě 13,03. V případě, že známe celkový objem tlumivky, tak nezbyvá než určit velikosti skutečných rozměrů tlumivky S_o, S_j a l_{Fe} .

$$S_j = \sqrt{\frac{L \cdot I_{max}^2 \cdot k_z}{B_{max} \cdot \sigma \cdot k_{p,Fe} \cdot k_{p,Cu}}} = \sqrt{\frac{0,003 \cdot 28,28^2 \cdot 0,71}{1,4 \cdot 2,829 \cdot 0,96 \cdot 0,5}} = 0,000946493 m^2 \doteq S_o \quad (5.6)$$

Máme-li určenou velikost průřezu jádra, tak nyní nám nic nebrání v tom, abychom určili šířku středového sloupku našeho magnetického obvodu. Pro EI plechy platí, že:

$$S_j = a^2 \quad (5.7)$$

Po úpravě předchozí rovnice zjistíme, že šířka středového sloupku bude v našem případě 30,7 mm. Nejbližší vyráběnou velikostí plechů řady EI je plech s celkovou šířkou 120 mm a šířkou středového sloupku 32 mm. Tuto velikost budeme brát jako námi zvolenou. Odvození požadované velikosti se nachází v rovnici 5.8.

$$a = \sqrt{S_j} = 0,0307 m \Rightarrow 30,7 mm \quad (5.8)$$

$$V_{Cu} = k_{p,Cu} \cdot V_v = k_{p,Cu} \cdot 4,5 \cdot a^3 = 0,5 \cdot 4,5 \cdot (0,0307)^3 = 0,000065102 mm^3 \quad (5.9)$$

$$l_{Fe} \cong 6\sqrt{S_o} \cong 6\sqrt{S_j} = 6\sqrt{0.000946493} = 0,1846m \quad (5.10)$$

Parametr l_{Fe} je tzv. délka siločáry feromagnetika a platí pro ni podmínka 5.11, která je s ohledem na rovnici 5.10 v tomto případě splněna.

$$l_{fe} > 4\sqrt{S_o} \quad (5.11)$$

Závity: Při znalosti rozměrových parametrů magnetického obvodu můžeme nyní určit potřebný počet závitů. Pro získání počtu závitů nám slouží vztah 5.12. Z výsledku je patrné, že musíme počet závitů zaokrouhlit na celé číslo.

$$N = \frac{L \cdot I_{max}}{B_{max} \cdot S_j \cdot k_{p,Fe}} = \frac{0,003 \cdot 28,28}{1,4 \cdot 0,001024 \cdot 0,96} = 61,64 \doteq 62 \quad (5.12)$$

Vzduchová mezera: Pro určení délky vzduchové mezery nám slouží dva vztahy, které se liší pouze v dosazování za počet závitů N . Výpočet mezery budu provádět pomocí vztahu 5.13.

$$l_v = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot I_{max}}{B_{max}} - \frac{l_{fe}}{\mu_{rFe}} = \frac{62 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 28,28}{1,4} - \frac{0,192}{41539} = 0,0015692m \quad (5.13)$$

$$l_w = \frac{L \cdot I_{max}^2 \cdot \mu_0}{B_{max}^2 \cdot S_{Fe}} - \frac{l_{fe}}{\mu_{rFe}} \quad (5.14)$$

Výsledná délka vzduchové mezery musí splňovat tzv. kontrolní kritérium realizovatelnosti vzduchové mezery (viz 5.15). Z výsledné nerovnice vidíme, že vzduchová mezera splňuje kritérium.

$$\frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} < l_v \ll \sqrt{S_{Fe}} \quad (5.15)$$

$$0,0000046 < 0,0015692 \ll 0,03135 \quad (5.16)$$

5.3 Minimalizace při zvoleném oteplení vinutí

V zadání práce byla určena teplotní třída izolace a teplota pracovního okolí.

$$P_{Cu} = k_{p,Cu} \cdot \rho_{Cu,20C} \cdot \sigma^2 \cdot V_v = 0,5 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot (3,229 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,000147456 = 13,068W \quad (5.17)$$

Před výpočtem šířky středového sloupku magnetického jádra je nutné vypočítat tzv. činitel přestupu tepla α . Parametr vinutí S_{vz} (obsah vyzařovací plochy) jsem určil na hodnotu $0,01872m^2$. Výsledný přestup tepla do okolí je poté dosazen do výsledné rovnice pro výpočet šířky středového sloupku jádra. Co se týče teploty T , tak přestože je její zadaná velikost $180\text{ }^\circ\text{C}$, tak my ji snížíme na $160\text{ }^\circ\text{C}$, neboť při provozu bude uvnitř vinutí vlivem teplotního spádu o $20\text{ }^\circ\text{C}$ vyšší teplota - tedy vedoucím zadaných $180\text{ }^\circ\text{C}$.

$$\begin{aligned} \alpha &\cong [5 + 0,04 \cdot (T - T_0) + 1,2v] + \frac{S_{vz}}{S_v} \cdot A \cdot \sigma_{sb} \cdot \frac{T^4 - T_0^4}{T - T_0} = \\ &= 9,8 + \frac{0,0104}{0,0208} \cdot 0,6 \cdot (5,67 \cdot 10^{-8}) \cdot \frac{652,8 \cdot 10^6}{120} = 9,96656 \end{aligned} \quad (5.18)$$

V následující rovnici je patrné, že se nevejdeme na jádro s rozměrem EI96/32. Mohli bychom sice zvýšit parametr $k_{p,Cu}$ a tím pádem se teoreticky dostat na nižší jádro, nicméně s přihlédnutím k tomu, že se nám musí do okénka vejít ještě kostra, na které bude vinutí umístěno, zvolíme následující řadu plechů, tzn. rozměr EI120/40.

$$a = \sqrt[7]{\frac{16 \cdot 4,5 \cdot L^2 \cdot I_{max}^4 \cdot k_z^2 \cdot \rho_{Cu}}{9 \cdot 13 \cdot k_{p,Cu} \cdot k_{p,Fe}^2 \cdot B_{max}^2 \cdot \Delta T \cdot \alpha}} \Rightarrow 34,27mm \quad (5.19)$$

5.4 Přepoččet na nový magnetický obvod

Nyní je nutné opětovně zkorigovat všechny parametry, tak aby tlumivka a její parametry vyhovovaly změně na nový rozměr magnetického jádra.

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\sqrt{k}} = \sigma_0 \sqrt{\frac{a_0}{a}} = 2,829 \sqrt{\frac{32}{40}} = 2,53A/mm^2 \quad (5.20)$$

$$N = \frac{L \cdot I_{max}}{B_{max} \cdot S_j \cdot k_{p,Fe}} = \frac{0,08484}{0,00215} = 39,45 \Rightarrow 40 \quad (5.21)$$

$$l_v = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot I_{max}}{B_{max}} - \frac{l_{fe}}{\mu_{rFe}} = \frac{40 \cdot (4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 28,28)}{1,4} - \frac{0,24}{41539} = 1,0096mm \quad (5.22)$$

$$\frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} < l_v \ll \sqrt{S_{Fe}} \quad (5.23)$$

$$0,000005777 < 0,001096 \ll 0,03919 \quad (5.24)$$

$$S_{Cu} = \frac{S_0 \cdot k_{p,Cu}}{N} = \frac{0,0012 \cdot 0,5}{40} = 15mm^2 \quad (5.25)$$

Volíme plochý vodič o šířce 4,75 mm a výšce 3,135 mm, to znamená že musíme znovu přepočítat proudovou hustotu σ , výsledné ztráty a činitel vinutí $k_{p,Cu}$.

$$k_{p,Cu} = \frac{N \cdot S_{Cu}}{S_0} = \frac{40 \cdot (0,003135 \cdot 0,00475)}{0,0012} = 0,496375 \quad (5.26)$$

Ztrátový výkon ve vinutí:

$$P_{Cu} = k_{p,Cu} \cdot \rho_{Cu,20C} \cdot \sigma^2 \cdot V_v = 0,496375 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot (1,343 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,000288 = 4,383W \quad (5.27)$$

Korigované ztrátové číslo: Nyní spočítáme přepočet ztrátového čísla plechů pro naší indukci a frekvenci:

$$\Delta p_{fe} = \Delta p_{1T} \cdot B_{Fe}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} = 0,413 \cdot 1,4^2 \cdot \left(\frac{400}{50}\right)^{1,3} = 12,084W/kg \quad (5.28)$$

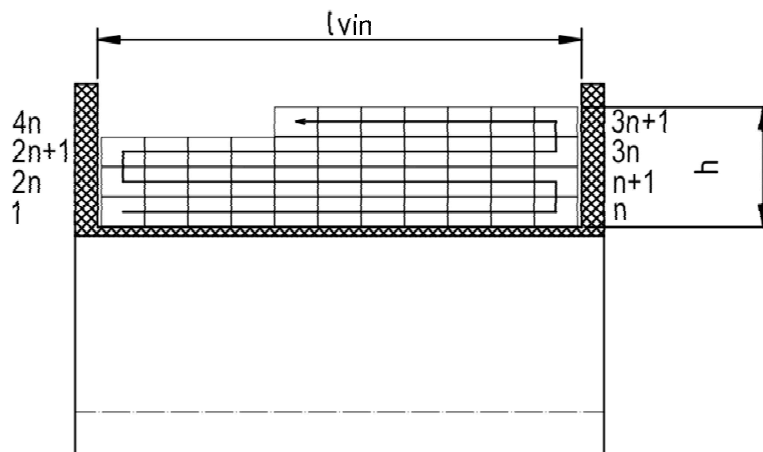
5.5 Výpočet konečného vinutí

Pro co neoptimálnější skladbu vinutí zvolím proudový vodič obdélníkového průřezu, přičemž budu vycházet z toho, že použitá kostra, do které se bude vinutí ukládat, má šířku prostoru $l_{vin} = 54,9mm$. Z technického katalogu zvolím šířku drátu $d = 4,750mm$ s dvojitým lakováním izolační vrstvy. Přírůstek této vrstvy činí $0,141mm$. Tím pádem budeme počítat s šířkou proudového vodiče $d_{i1} = 4,891mm$. To znamená, že do jedné vrstvy vinutí se mi vejde 11 závitů. Celkový počet vrstev vychází 3,5, tím pádem se vejdem do 4 vrstev vinutí. Výpočty jsou uvedeny pod odstavcem. Na obrázku 5.1 je znázorněno, jak bude vinutí rozloženo ve finálním provedení.

$$n = \frac{l_{vin}}{d_{i1}} = \frac{54,9}{4,891} = 11,22 \Rightarrow 11 \quad (5.29)$$

$$v = \frac{N}{n} = \frac{40}{11} = 3,6 \Rightarrow 4 \quad (5.30)$$

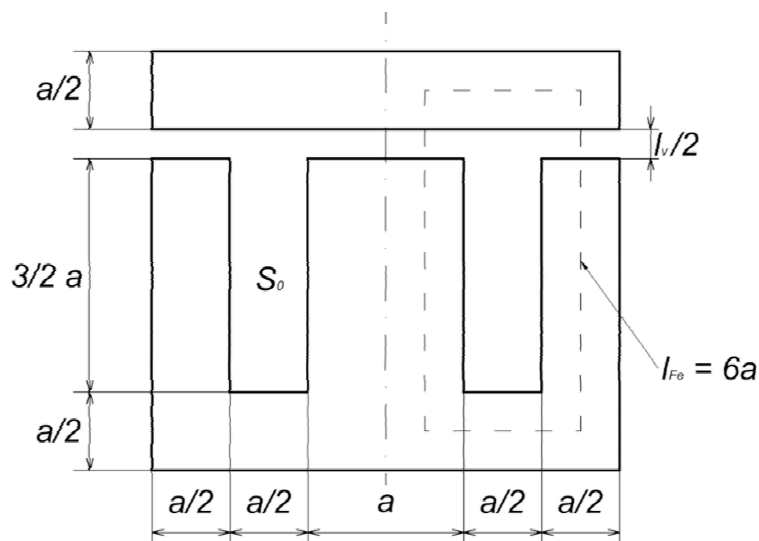
$$h = v \cdot d_{i2} = 4 \cdot 3,276 = 13,104mm \quad (5.31)$$



Obr. 5.1: Finální rozložení vinutí na kostře (čerpáno z [13])

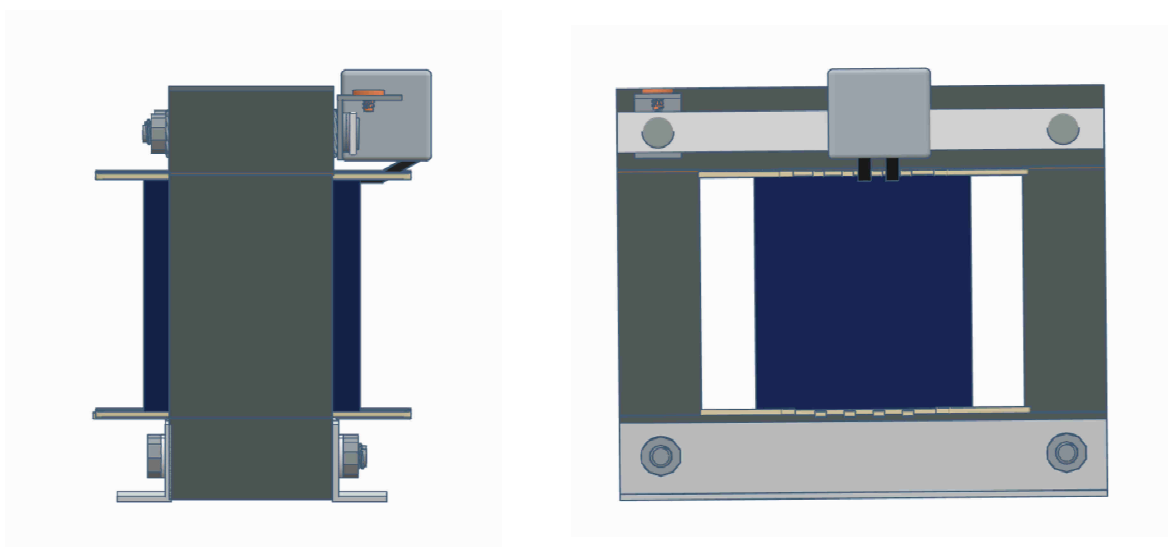
5.6 Výsledné shrnutí návrhu

Na obrázku 5.2 je zobrazena výsledná podoba magnetického obvodu, přičemž rozměry (které popisují výsledné rozměry jádra) jsou uvedeny v tabulce 5.4. Z předchozích výpočtů je tedy patrné, že tlumivka bude navinutá na kostře EI120/40 plochým drátem z mědi o šířce 4,75 mm a výšce 3,135 mm. Drát bude mít povrch ošetřen dvojitým lakováním a bude navinut do výšky 13,104 mm. Na kostře cívky bude tímto vodičem navinuto 40 závitů přesně podle našeho výpočtu.



Obr. 5.2: Návrh magnetického obvodu s rozměry (překresleno z [4])

Finální podoba tlumivky by mohla vypadat zhruba takto, viz obrázek 5.3



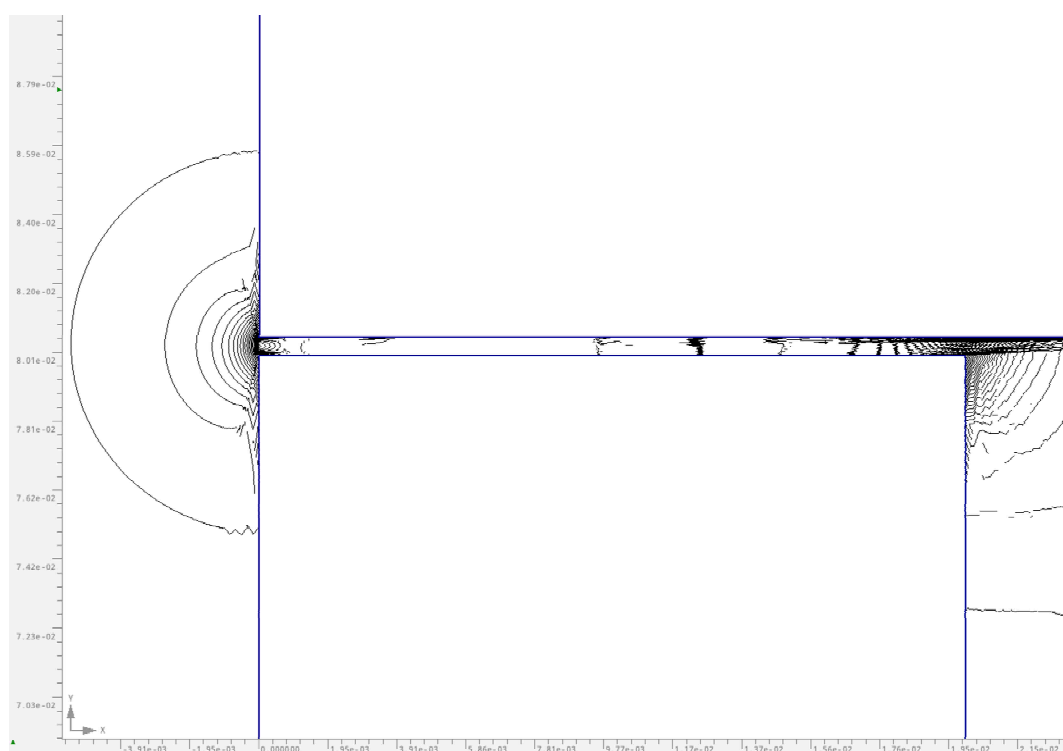
Obr. 5.3: Tlumivka s EI plechy na jádře EI120/40

Tab. 5.4: Výsledné rozměry magnetického obvodu

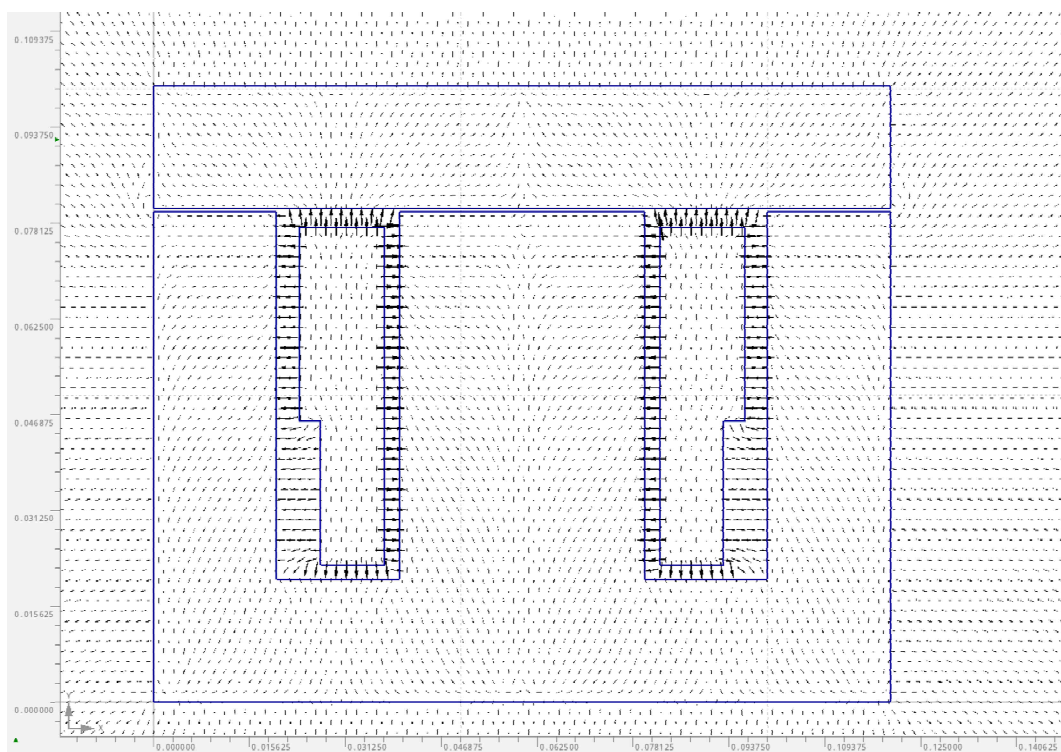
S_j	Průřez středového sloupku	$0,0016m^2$
S_o	Plocha okna pro vinutí	$0,0012m^2$
l_{Fe}	Střední délka siločáry feromagnetika	$0,24m$
$l_{z,st}$	Střední délka jednoho závitu	$0,24m$
V_j	Objem jádra	$0,000384m^3$
V_v	Objem vinutí	$0.000288m^3$
V_{Cu}	Objem reálného vinutí	$0.000144m^3$
V_{celk}	Celkový objem tlumivky	$0.00672m^3$
S_v	Viditelný chladicí povrch vinutí	$0.0208m^2$
$S_{j,ch}$	Viditelný chladicí povrch jádra	$0.032m^2$
S_{vz}	Zářivý nezastíněný povrch	$0,01872m^2$

6

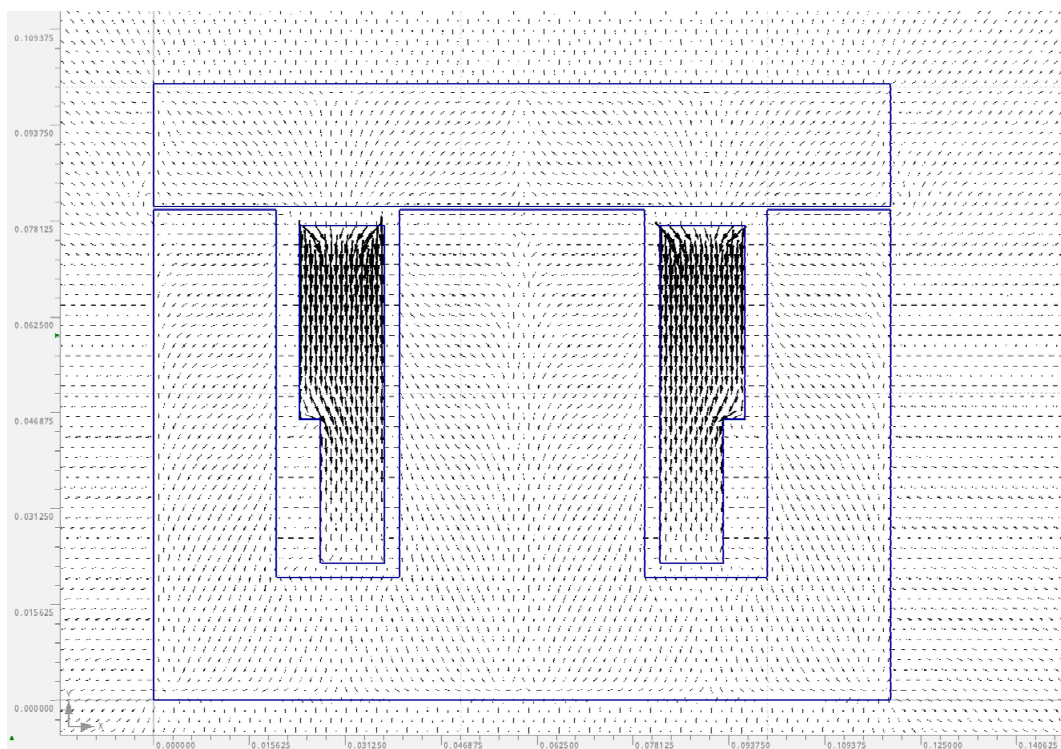
Výsledky metody konečných prvků



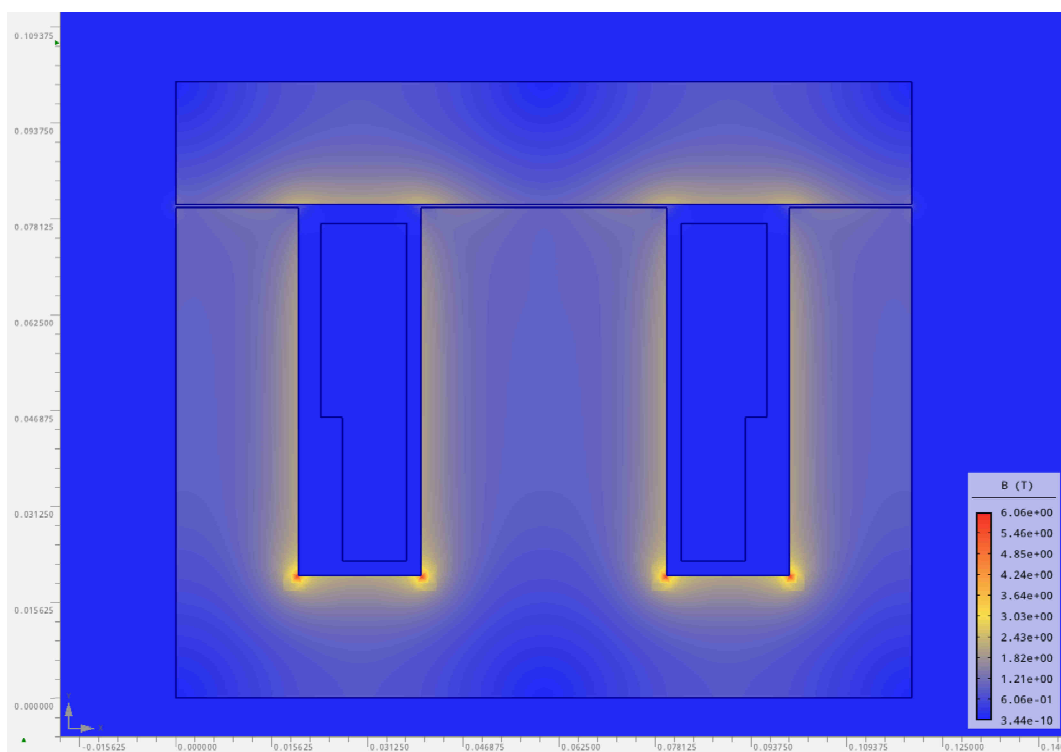
Obr. 6.1: Rozložení pole v okolí vzduchové mezery



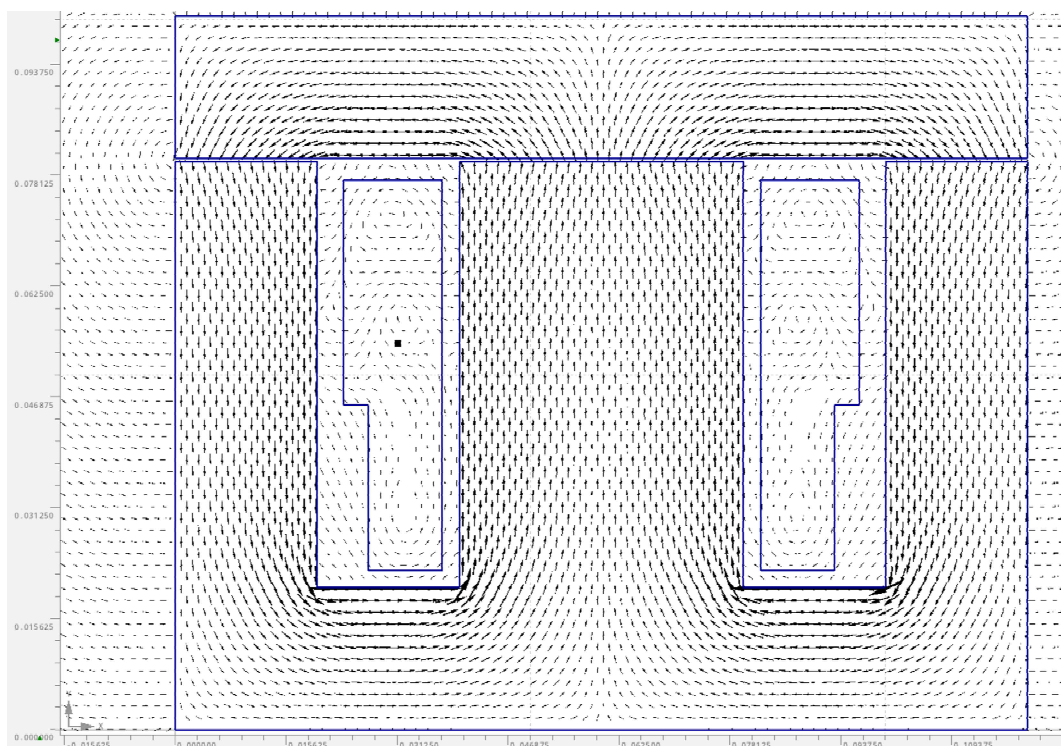
Obr. 6.2: Teplotní gradient tlumivky



Obr. 6.3: Teplotní tok tlumivky



Obr. 6.4: Skalární zobrazení magnetické indukce



Obr. 6.5: Siločáry magnetické indukce

7

Závěr

7.1 Diskuze a porovnání výsledků s předpokládanými daty

Z výsledků programu Rale je patrné, že jsme zadanou hodnotu $L=3\text{mH}$ přesáhli o zhruba $0,5\text{mH}$ (příloha A.1, A.4). Taktéž je patrné že zadanou teplotní třídu jsme nepřesáhli, ovšem je zde už pouze malá teplotní rezerva. Tato odchylka může mít dvě konkrétní příčiny. První z nich je, že jsme počítali s malým teplotním spádem uvnitř vinutí. Respektive předpoklad byl, že uvnitř vinutí bude zhruba o $20\text{ }^\circ\text{C}$ více, což je pouze experimentální předpoklad který nemusí vždy souhlasit. Dalším možným vysvětlením je, že máme příliš malý chladicí povrch vinutí a železného jádra. Konstrukce se prováděla na kostru se čtvercovým sloupkem, nicméně při použití obdélníkového sloupku by došlo ke zvýšení plochy vinutí i magnetického jádra a tím pádem by se zvětšila i tepelná vyzařovací plocha. Další způsob jak omezit teplotní nárůst by byl, že bychom snížili počet závitů na 37, tím pádem by se zmenšil činitel plnění vinutí $k_{p,Cu}$ a zvýšili by se vzduchové mezery mezi vinutím a jádrem. Vzduch by poté lépe proudil a účinněji odváděl teplo z vinutí. Při snížení počtu závitů na 37, by indukčnost L vycházela podle programu Rale přesně podle zadané hodnoty.

Z výsledků metody konečných prvků lze spatřit, že rozložení magnetického pole souhlasí s výsledkem šetření magnetického pole v okolí tlumivky v obou případech (příloha A.5). Co se týče výsledků oteplení, tak nejvíce tepla přecházelo do magnetického obvodu z vinutí. Lze si také všimnout, že nejvíce tepla se soustředilo v ostrých přechodech vinutí (viz obrázek 6.2), to znamená v místech s nejvyšším gradientem (to odpovídá předpokladu) a do tohoto bodu docházelo i k největšímu teplotnímu toku 6.3.

Při vyšetřování magnetické indukce B v tlumivce a jejím okolí se výsledky metody konečných prvků a programu Rale rozcházejí. Respektive při řešení metodou konečných prvků byly výsledky pro vzduchovou mezeru cca. $B=0,98\text{ T}$, naopak tomu bylo v programu Rale, kde byla indukce $B=0,887\text{ T}$. Pro průměrnou hodnotu v magnetickém obvodu nám metodou konečných prvků vyšla indukce $B=1,13\text{ T}$. Programem Rale nám průměrná

magnetická indukce vyšla $B=0,963$ T (příloha A.1). V obou případech tedy vyšla hodnota metodou konečných prvků vyšší, než v případě výpočetního programu Rale. Za zmínku stojí, že největší magnetická indukce se nacházela v ostrém přechodu magnetického obvodu (přechod mezi krajním sloupkem a dolním I plechem), viz obrázek 6.4 .

Literatura

- [1] HAVLÍČEK, Václav, Martin POKORNÝ a Ivan ZEMÁNEK. *Elektrické obvody 1*. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2014, 290 s. ISBN 978-80-01-05492-5.
- [2] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [3] ÚNMZ. ČSN EN 60076-6 *Výkonové transformátory: Část 6: Tlumivky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 100 s.
- [4] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [5] KUBEŠ, Ing. Karel. *Odlévané cívky pro elektrické stroje: inovace, technologie, projekty*. ELEKTRO. Pod Vodárenskou věží 4, 182 08 Praha 8: FCC Public, 2018, 26.(5.), 52. ISSN 1210-0889.
- [6] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-49-x.
- [7] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 1*. 3. oprav. a dopl. vyd. Praha 8: Československá akademie věd, 1980, 388 s. ISBN 509-21-857.
- [8] PANKRÁČ, Vítězslav. *Často používané aplikace tlumivek v silnoproudé elektrotechnice: Tlumivky v silnoproudé elektrotechnice (Část 2) [online]*. 2010, 21 s. [cit. 2018-03-18]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/casto-pouzivane-aplikace-tlumivek-v-silnoproude-elektrotechnice/>
- [9] PANKRÁČ, Vítězslav. *Základní druhy konstrukčního uspořádání tlumivek: Tlumivky v silnoproudé elektrotechnice (Část 1) [online]*. 2009, 8 s. [cit. 2018-03-18]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/zakladni-druhy-konstrukcniho-usporadani-tlumivek/>
- [10] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.

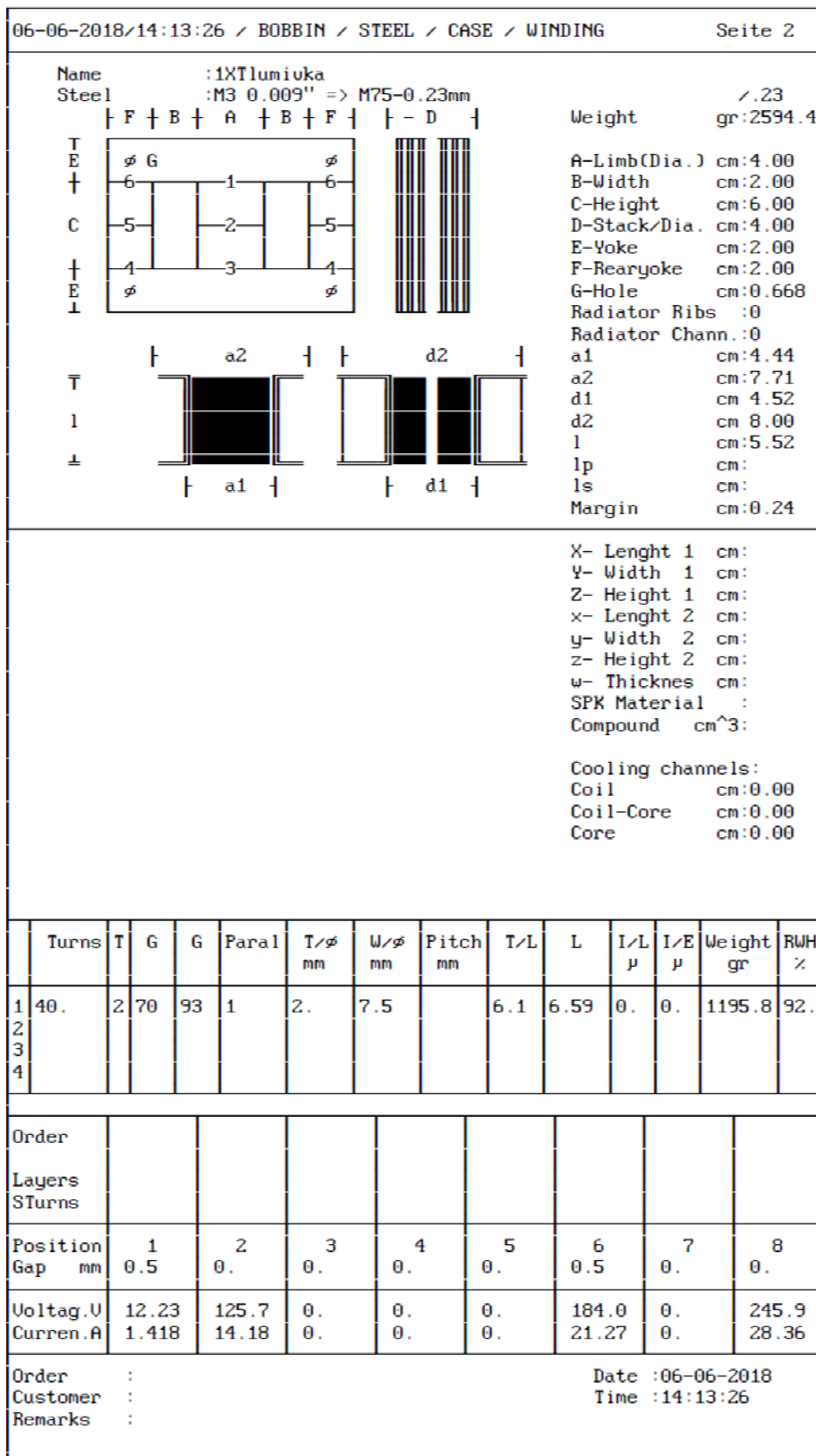
- [11] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROŠR a Pavel TRNKÁ. Diagnostika elektrických zařízení. Praha 10, Věšínova 5: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [12] *Bezpečnost výkonových transformátorů, napájecích zdrojů, tlumivek a podobných výrobků: Část 1: Všeobecné požadavky.* 2. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2005, 148 s. 2.
- [13] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice.* 4., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 978-80-7300-190-2.

Příloha A

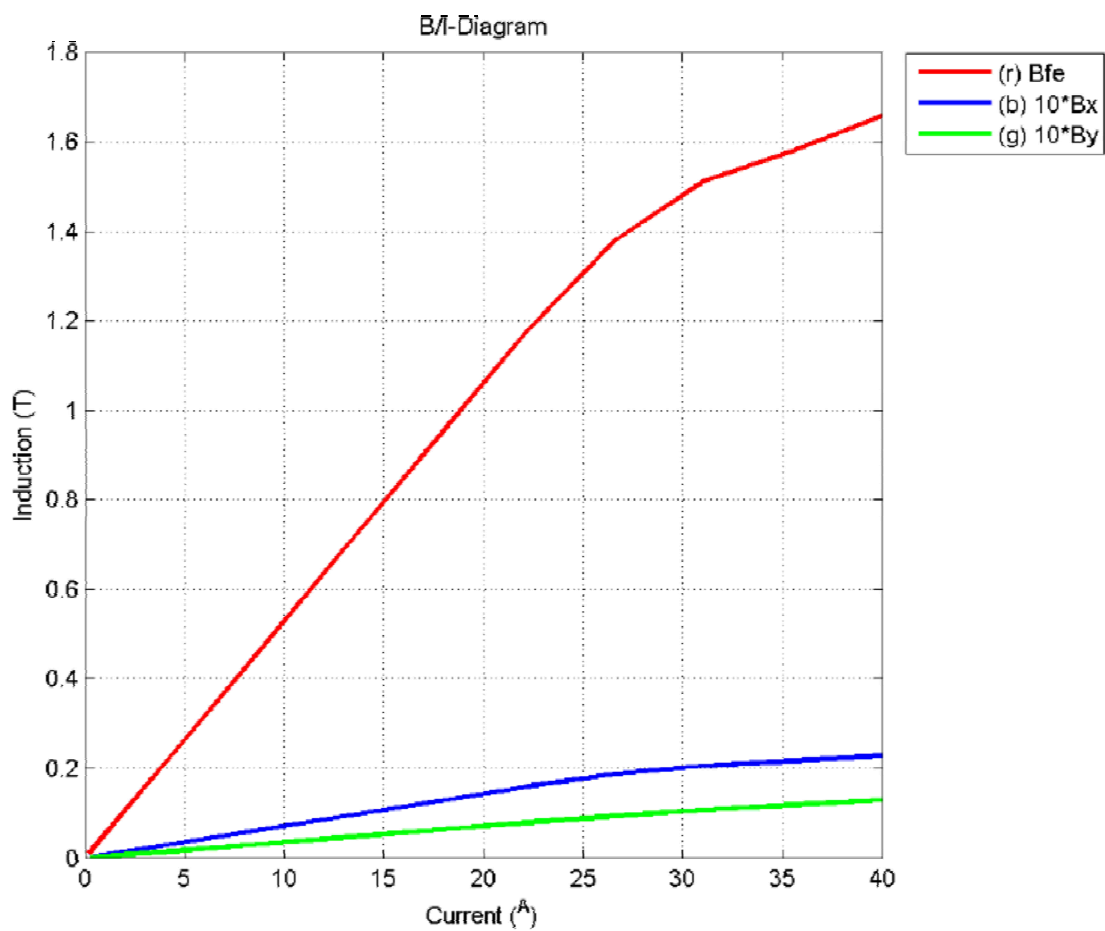
Přílohy

06-06-2018/14:13:26/16.50 INPUT and OUTPUT		Seite 1							
Schema :1.	L mH I ^A	1---	2---	3---	4---	5---	6---	7---	8---
L-Type *:3.	Harmo. -:1								
Wire -:3.	Curre. A:20								
Ins/L μ:0.	Angle °:0.								
Ins/E μ:0.									
Al/Cu -:1.									
Fre.Hz:400									
Ripple %:100.									
Q-Factor :50	Steel -:8	Cooling *:1	Bobbin -:1						
Kal.Freq.Hz:400	Induction T:1.4	Uentil. m/s:0	Stomach *:0						
LQFreq. Hz:0	Plate -:1	Brackets -:1	Rac/Rdc *:1.05						
:0	W/kg *:1	Radiator -:0	Space Fac. *:0.5						
Amb.Temp.°C:40	UAr/kg *:1	Chassis -:1	Force -:0						
Tmp.rise °K:120	Gap posit. *:1	Channel cm:0.	Windintech. -:1						
Time 1 Min:1	Annealed -:1	Cu-Surfac. *:0	Impregnat. -:1						
Load 1 *:0.1	Stack.Fac. *:0.96	Rth-Uarn. *:1	Full Layer -:0						
Time 2 Min:1	Hole -:1	Rth-Comp. *:1	Selection -:3						
Load 2 *:0	Core Asse. -:1	Case -:0	Criterion -:3						
Type of the Inductance $L=U*dt/\wedge I$									
Baue T: 0.963 Bgap T: 0.887 Bmax T: 1.059									
Nominal operation mode at the temperature °C 177.2									
Nominal current Inom rms A:20.0					Peak current of Inom ^A:28.2				
Al/Cu Losses/phase W:31.48					Steel Losses/phase(activ) W:115.4				
Addy current losses factor :4.578					Q-Factor :509.7				
dT Fe (average) °K:143.6					dT Winding (hot spot) ^°K:137.2				
dT Case (average) °K:0.0					dT Windig (average) °K:136.6				
Baue T: 1.302 Bgap T: 1.199 Bmax T: 1.428 Bx T: 0.019 By T: 0.009									
Harmonics :1. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.									
Current rms A:20.									
Al/Cu Losses W:31.48									
Fe-Losses W:115.4									
Duty cycle operation mode at the amboent temperature °C 42.56									
dT Steel (average) °K:2.623					dT Winding (hot spot) °K:2.561				
dT Case (average) °K:0.0					dT Winding (average) °K:2.550				
Inductance and induction at the impressed peak current									
Current ^A	2.	20.	.	.	.	30.	.	40.	.
Induction ^T	.095	.963	.	.	.	1.347	.	1.51	.
L=U1/R1/I1	mH								
L=U1/R1/Ieff	mH								
L=ΣU*t/^I	mH	3.453	3.487	0.	0.	0.	3.251	0.	2.772
L=dU/R1/dI	mH								
Leaking Ind.	mH	0.491	0.495	0.	0.	0.	0.467	0.	0.411
Gap-Induct.	mH	3.042	3.037	0.	0.	0.	2.848	0.	2.467

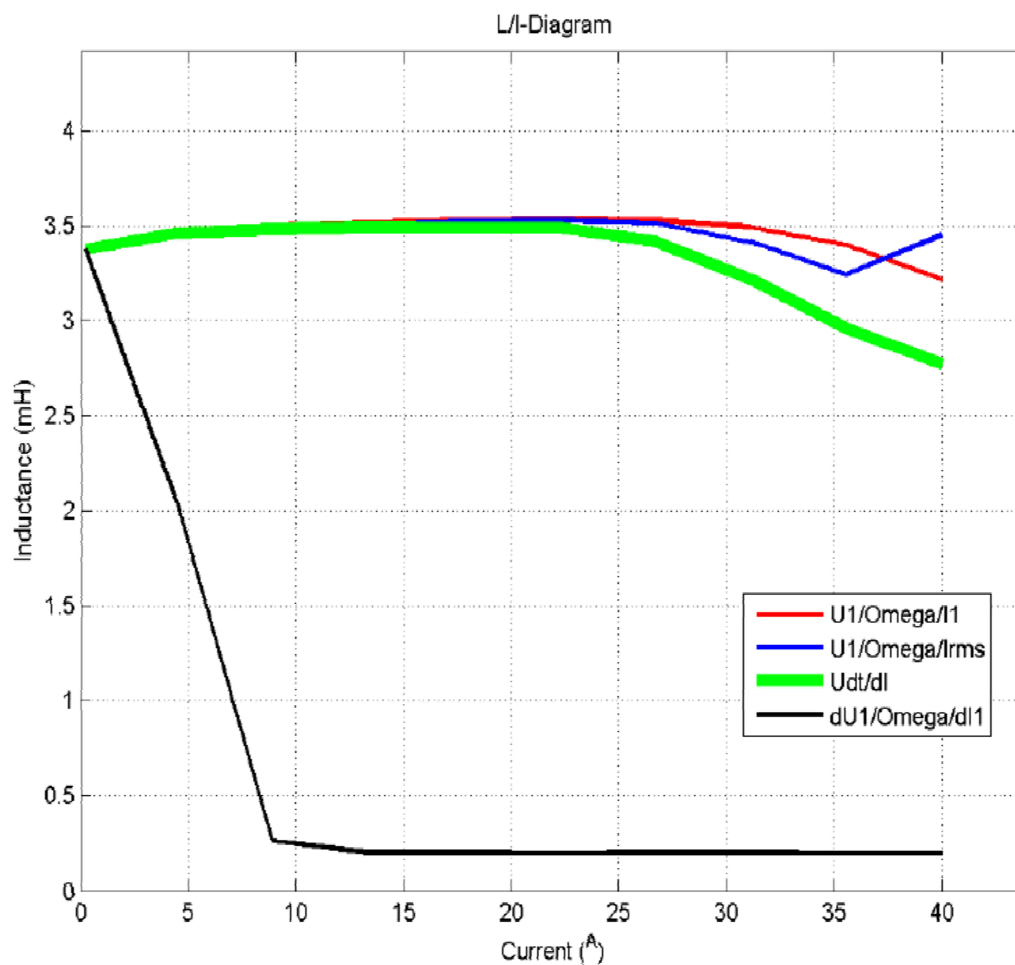
Obr. A.1: Výstup návrhu programu Rale(exportováno z Rale)



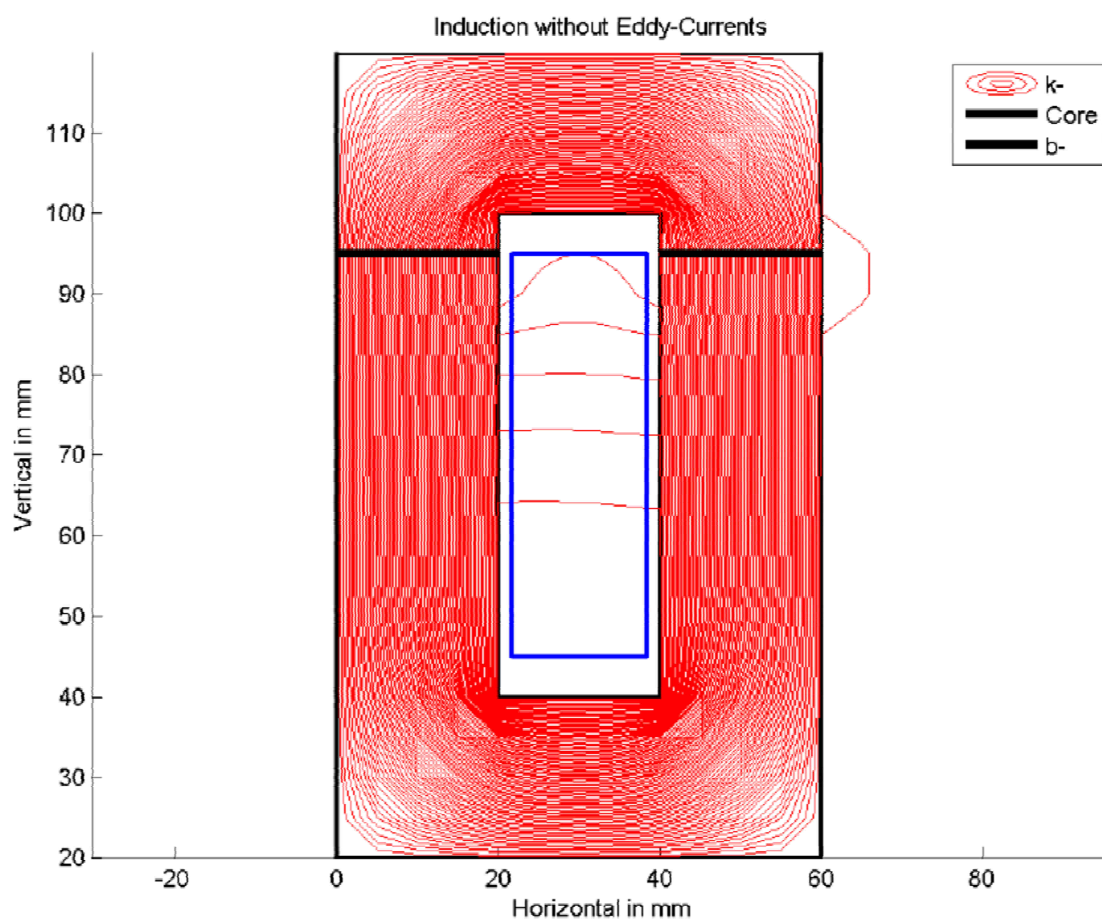
Obr. A.2: Výstup návrhu programu Rale (exportováno z Rale)



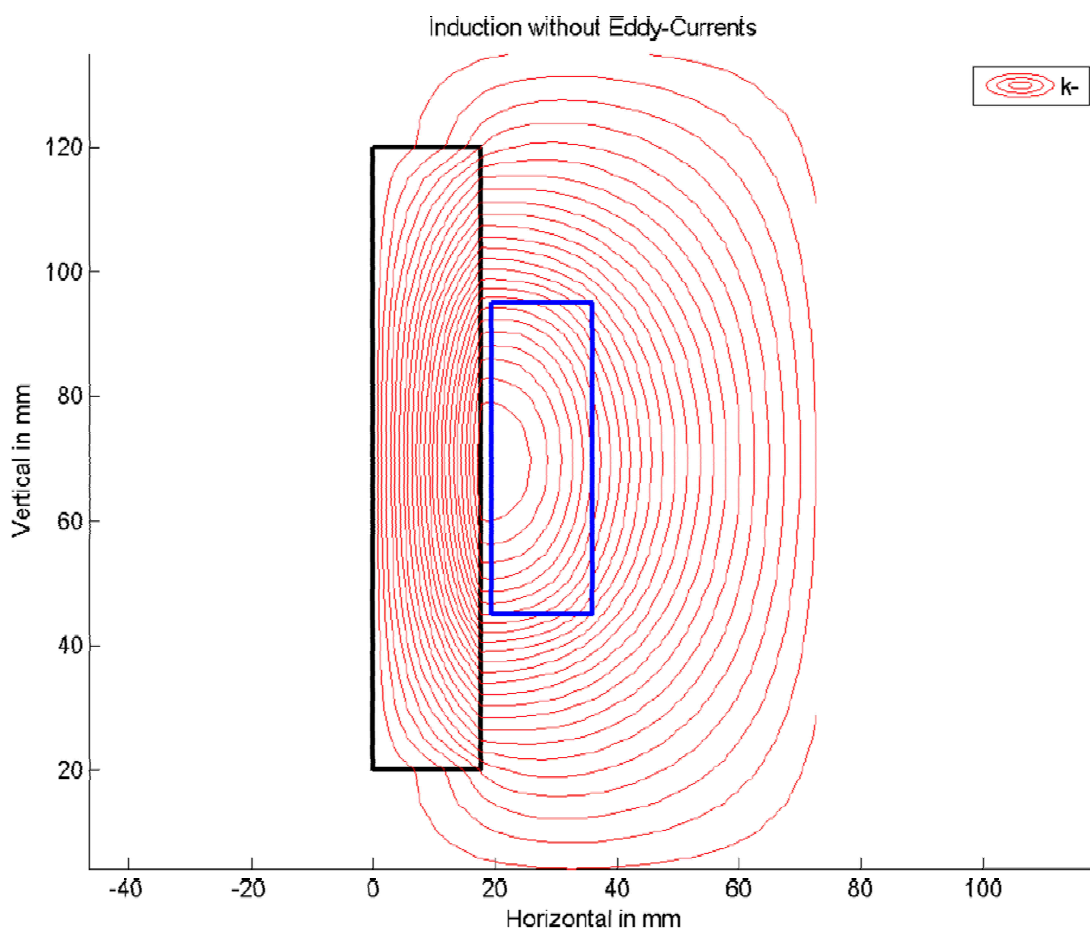
Obr. A.3: Závislost sycení jádra na proudu (exportováno z Rale)



Obr. A.4: Závislost indukčnosti na proudu (exportováno z Rale)



Obr. A.5: Kontury magnetické indukce (exportováno z Rale)



Obr. A.6: Kontury magnetické indukce ve vnějším poli (exportováno z Rale)