

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh 3f tlumivky

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vít ZÁRUBA**
Osobní číslo: **E19N0029P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Téma práce: **Návrh 3f tlumivky**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Navrhněte analyticky 3f tlumivku daných parametrů.
2. Proveďte kontrolu návrhu pomocí konečných prvků.
3. Proveďte kontrolní měření na vzorku tlumivky.
4. Shrňte dosažené výsledky.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

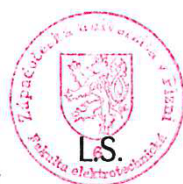
1. Bartoš, V., Skala, B. : Měření na elektrických strojích. Skripta ZČU, Plzeň 2002.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Dodatek k zadání Diplomové práce

Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v akademickém roce 2020/2021

V souvislosti s krizovým opatřením vyhlášeným dle krizového zákona a mimořádným opatřením vydaným podle zvláštního zákona, na základě kterých došlo k omezení osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy a s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období tohoto omezení a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání tohoto omezení se v intencích čl. 54 odst. 4 Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni upravuje zadání práce takto:

Body 1, 2 a 4 zůstávají v plném rozsahu.

Body 3. Proveďte kontrolní měření na vzorku tlumivky.

je změněn na:

3. Navrhněte vhodnou stahovací konstrukci pro montáž tlumivky.

V Plzni dne 31.03.2021



.....
Vedoucí práce:

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne

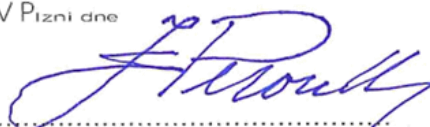
07.04.21



.....
Student:

08.04.21

V Plzni dne



.....
prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh dvou prototypů třífázových tlumivek podle požadavků zadavatele, kde každá má odlišné parametry. První část se zabývá teorií cívek a tlumivek, jejími druhy a použitím v praxi, metodou konečných prvků a programem ANSYS Maxwell. Druhá část pojednává o mechanické konstrukci, teplotní analýze, analytickém návrhu, ověření analytického návrhu a úpravě parametrů třífázových tlumivek na základě metody konečných prvků provedené v programu ANSYS Maxwell. V závěrečné části jsou pro navržené a zkonstruované prototypy třífázových tlumivek uvedena plánovaná kontrolní měření pro ověření toho zda bylo skutečně dosaženo požadavků daných zadavatelem.

Klíčová slova

Analytický návrh, ANSYS Maxwell, cívka, induktor, konstrukce prototypů, metoda konečných prvků, MKP, teplotní analýza, třífázová tlumivka

Abstract

The master's thesis is focused on the design of two prototypes of three phase chokes according to the requirements of customer, where each has different parameters. The first part is an introduction to the theory of coils and chokes, its types and use in practice, finite element method and ANSYS Maxwell software. The second part describes the mechanical construction, thermal analysis, analytic design, verification of the analytic design and modification of the parameters of three phase chokes based on finite element method using ANSYS Maxwell software. In the final part, the planned control measurements are given for designed and constructed prototypes of three phase chokes to verify whether the requirements given by the client have actually been achieved.

Key words

Analytic design, ANSYS Maxwell, coil, finite element method, FEM, inductor, prototype design, thermal analysis, three-phase choke

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Vít Záruba

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále také doc. Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. a Ing. Lukášovi Sobotkovi za seznámení s programy ANSYS Maxwell a ANSYS Workbench a pomoc při modelování v nich.

Obsah

OBSAH	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	15
ÚVOD	17
1 CÍVKA	19
1.1 CÍVKA VE STEJNOSMĚRNÉM OBVODU.....	20
1.2 CÍVKA VE STŘÍDAVÉM OBVODU.....	21
1.3 PRVKY CÍVEK.....	24
1.4 DRUHY CÍVEK.....	26
1.5 POUŽITÍ CÍVEK.....	27
1.6 TLUMIVKA.....	27
1.6.1 Použití tlumivek.....	28
2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	30
3 PROGRAM ANSYS MAXWELL	33
4 NÁVRH PROTOTYPŮ 3 FÁZOVÝCH TLUMIVEK	35
4.1 POŽADOVANÉ PROVOZNÍ A MECHANICKÉ PARAMETRY.....	35
4.2 POŽADOVANÉ ELEKTRICKÉ PARAMETRY.....	36
4.3 ANALYTICKÝ NÁVRH.....	36
4.3.1 Tlumivka 2 mH.....	40
4.3.2 Tlumivka 4 mH.....	42
4.4 OVĚŘENÍ ANALYTICKÉHO NÁVRHU.....	44
4.4.1 Tlumivka 2 mH.....	46
4.4.2 Tlumivka 4 mH.....	51
4.5 TEPLOTNÍ ANALÝZA.....	55
4.5.1 Tlumivka 2 mH.....	60
4.5.2 Tlumivka 4 mH.....	63
4.6 MECHANICKÁ KONSTRUKCE.....	65
4.6.1 Magnetický obvod.....	65
4.6.2 Kostry cívek.....	66
4.6.3 Cívky.....	68
4.6.4 Spojovací konstrukce.....	69
4.6.5 Uchycovací patka.....	70
4.6.6 Konektory.....	71
4.6.7 Výsledná mechanická konstrukce.....	72
5 KONTROLNÍ MĚŘENÍ	75
5.1 MĚŘENÍ INDUKČNOSTÍ.....	75
5.2 MĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ CÍVEK.....	76
5.3 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO.....	78
5.4 MĚŘENÍ OTEPLENÍ.....	78
ZÁVĚR	80
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	83

Seznam symbolů a zkratek

$1D$	Jednorozměrný
$2D$	Dvojměrný
$3D$	Trojměrný
$3f$	Třífázový
a	Teplotní vodivost (difuzivita) (m^2/s)
$ANSYS$	ANalysis SYStems
B_m	Maximální magnetická indukce (T)
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporovaný návrh)
CPU	Central Processing Unit (centrální procesorová jednotka)
DCL	Střída (Duty Cycle)
DPS	Deska plošných spojů
f	Frekvence (Hz)
FEM	Finite Element Method
GPU	Graphics Processing Unit (grafická procesorová jednotka)
HPC	High Performance Computing (vysoce výkonné výpočty, výpočetní cluster)
I, i	Efektivní hodnota, okamžitá hodnota elektrického proudu (A)
i_L	Elektrický proud cívku (A)
I_{LP}	Elektrický proud ideální cívku v náhradním schématu skutečné cívky (A)
I_{NOM}	Nominální elektrický proud tlumivkou (A)
I_{ON}	Krátkodobý elektrický proud tlumivkou po dobu 60 s při střídě 40 % (A)
I_{PEAK}	Špičkový elektrický proud tlumivkou po dobu 0,5 s (A)
I_{RP}	Elektrický proud ideálním rezistorem v náhradním schématu skutečné cívky (A)
j	Imaginární jednotka
k_H	Konstanta měrného činného ztrátového výkonu hysterezí Steinmetzovy rovnice
k_P	Konstanta měrného činného ztrátového výkonu přídavného Steinmetzovy rovnice

k_{VP}	Konstanta měrného činného ztrátového výkonu vířivými proudy Steinmetzovy rovnice
l	Délka (m)
L	Vlastní indukčnost (H)
LCP	Kapalně krystalický polymer
L_D	Vlastní dynamická (diferenciální) indukčnost (H)
L_P	Vlastní indukčnost ideální cívky v paralelním náhradním schématu skutečné cívky (H)
L_{PA}	Hladina akustického tlaku vážená váhovou funkcí A (dBA)
L_S	Vlastní statická indukčnost, vlastní indukčnost ideální cívky v sériovém náhradním schématu skutečné cívky (H)
$M4$	Metrický závit s průměrem 4 mm
MKP	Metoda Konečných Prvků
N	Počet závitů cívky (-)
Nu	Nusseltovo číslo (-)
PA	PolyAmid
PBT	PolyButylenTereftalát
PE	Protective Earth (ochranný vodič)
PET	PolyEtylenTereftalát
PF	Fenolformaldehydová pryskyřice
PI	PolyImid
PPA	Polyftalamid
Pr	Prandtlovo číslo (-)
$Pt1000$	Platinové odporové teplotní čidlo s rezistancí 1000 Ω při teplotě 0 °C
PVC	PolyVinylChlorid
Q	Jalový výkon (var)
Q_P	Činitel jakosti paralelního náhradního schématu skutečné cívky (-)
Q_S	Činitel jakosti sériového náhradního schématu skutečné cívky (-)
R	Rezistance (Ω)
RAM	Random Access Memory (volně přístupná paměť)
Re	Reynoldsovo číslo (-)
R_m	Magnetický odpor, reluktance (H^{-1})
R_P	Paralelní rezistance náhradního schématu skutečné cívky (Ω)
R_S	Sériová rezistance náhradního schématu skutečné cívky (Ω)

S	Plocha průřezu, plocha (m^2)
STL	Formát souboru pro stereolitografii vytvořený CAD programem
t_F	Tloušťka feromagnetika (m)
$tg\delta_P$	Ztrátový činitel paralelního náhradního schématu skutečné cívky (-)
$tg\delta_S$	Ztrátový činitel sériového náhradního schématu skutečné cívky (-)
U	Efektivní hodnota fázového napětí (V)
U_0	Amplituda napětí harmonického zdroje, elektromotorické napětí stejnosměrného zdroje (V)
u_i	Elektromotorické indukované napětí cívky (V)
u_L	Svorkové indukované napětí cívky (V)
U_{LS}	Elektrické napětí ideální cívky v sériovém náhradním schématu skutečné cívky (V)
U_{RS}	Elektrické napětí ideálního rezistoru v sériovém náhradním schématu skutečné cívky (V)
v	Rychlost proudění (m/s)
W_m	Energie magnetického pole (J)
X_L	Induktivní reaktance (Ω)
Z	Impedance (Ω)
α	Součinitel přestupu tepla ($W/m^2 \cdot K$)
Δp	Celkový měrný činný ztrátový výkon hysterezí v magnetickém obvodu (W/kg)
ΔP	Činné výkonové ztráty (W)
ΔP_0	Celkové činné výkonové ztráty naprázdno (W)
ΔP_{Fe}	Činné výkonové ztráty magnetického obvodu (W)
Δp_H	Měrný činný ztrátový výkon hysterezí v magnetickém obvodu (W/kg)
ΔP_{J_0}	Činné výkonové ztráty vinutí cívek naprázdno (W)
Δp_P	Měrný činný ztrátový výkon přídavný v magnetickém obvodu (W/kg)
Δp_{VP}	Měrný činný ztrátový výkon vířivými proudy v magnetickém obvodu (W/kg)
Δt	Změna času (s)
$\Delta \vartheta$	Oteplení (K), ($^{\circ}C$)
η	Dynamická viskozita (Pa·s)
λ	Tepelná vodivost ($W/m \cdot K$), Celkový účinník (-)

μ_0	Permeabilita vakua (H/m)
μ_r	Relativní permeabilita (-)
ν	Kinematická viskozita (m ² /s)
ρ	Rezistivita ($\Omega \cdot m$), Hustota (kg/m ³)
ρ_F	Hustota feromagnetika (kg/m ³)
σ	Konduktivita (S/m)
φ	Fázový posun (rad), (°)
Ψ	Spřažený magnetický indukční tok (Wb)
ω	Úhlová (frekvence) rychlost (rad/s)
Φ	Magnetický indukční tok (Wb)

Seznam obrázků a tabulek

OBR. 1 NÁHRADNÍ ELEKTRICKÉ SCHÉMA CÍVKY SÉRIOVÉ (VLEVO) A PARALELNÍ (VPRAVO)	19
OBR. 2 ELEKTRICKÉ SCHÉMA STEJNOSMĚRNÉHO OBVODU SE SKUTEČNOU CÍVKOU (VLEVO) A PRŮBĚHY VELIČIN BĚHEM PŘECHODOVÉHO DĚJE (VPRAVO)	21
OBR. 3 VEKTOROVÝ DIAGRAM IMPEDANCE CÍVKY	22
OBR. 4 VEKTOROVÝ DIAGRAM CÍVKY PRO NÁHRADNÍ ELEKTRICKÉ SCHÉMA SÉRIOVÉ (VLEVO) A PARALELNÍ (VPRAVO)	22
OBR. 5 ELEKTRICKÉ SCHÉMA STŘIDAVÉHO OBVODU SE SKUTEČNOU CÍVKOU (VLEVO) A PRŮBĚHY VELIČIN BĚHEM PŘECHODOVÉHO DĚJE (VPRAVO)	23
OBR. 6 TVARY PRVKŮ POUŽÍVANÝCH PRO DISKRETIZACI ŘEŠENÉ OBLASTI	32
OBR. 7 MAGNETICKÝ OBVOD (VLEVO) A JEHO ANALOGICKÝ ELEKTRICKÝ OBVOD (VPRAVO)	38
OBR. 8 LINEARIZACE MAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKY MATERIÁLU M250-50A	39
OBR. 9 ZÁVISLOST ČINNÉHO ZTRÁTOVÉHO VÝKONU NAPRÁZDNO MAGNETICKÉHO OBVODU Z MATERIÁLU M250-50A NA MAGNETICKÉ INDUKCI PRO FREKVENCÍ 50 HZ	39
OBR. 10 MODEL TLUMIVKY SE SÍTÍ ČTYŘSTĚNŮ V PROSTŘEDÍ PROGRAMU ANSYS	46
OBR. 11 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVEK JEDNOTLIVÝCH FÁZÍ S 61 ZÁVITY NA VÝŠCE STŘEDNÍHO SLOUPKU MAGNETICKÉHO OBVODU	47
OBR. 12 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVEK JEDNOTLIVÝCH FÁZÍ S 64 ZÁVITY NA VÝŠCE STŘEDNÍHO SLOUPKU MAGNETICKÉHO OBVODU	47
OBR. 13 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVEK NA POČTU ZÁVITŮ STŘEDNÍ CÍVKY	48
OBR. 14 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVEK NA PROUDU	49
OBR. 15 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVEK NA PROUDU S UPRAVENÝM POČTEM ZÁVITŮ	50
OBR. 16 ZÁVISLOST CELKOVÝCH ČINNÝCH VÝKONOVÝCH ZTRÁT VE VINUTÍ CÍVEK A MAGNETICKÉM OBVODU (ŽELEZE).....	51
OBR. 17 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVEK JEDNOTLIVÝCH FÁZÍ S 86 ZÁVITY NA VÝŠCE STŘEDNÍHO SLOUPKU MAGNETICKÉHO OBVODU	52
OBR. 18 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVEK JEDNOTLIVÝCH FÁZÍ S 91 ZÁVITY NA VÝŠCE STŘEDNÍHO SLOUPKU MAGNETICKÉHO OBVODU	52
OBR. 19 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVEK NA POČTU ZÁVITŮ STŘEDNÍ CÍVKY	53
OBR. 20 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVEK NA PROUDU	54
OBR. 21 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVEK NA PROUDU S UPRAVENÝM POČTEM ZÁVITŮ	54
OBR. 22 ZÁVISLOST CELKOVÝCH ČINNÝCH VÝKONOVÝCH ZTRÁT VE VINUTÍ CÍVEK A MAGNETICKÉM OBVODU (ŽELEZE).....	55
OBR. 23 3D MODEL TLUMIVKY V PROGRAMU ANSYS SPACECLAIM SE ZVÝRAZNĚNÍM VZDUCHOVÝCH PROSTŘEDÍ (TMAVĚ ORANŽOVÁ)	56
OBR. 24 SOUŘADNÉ SYSTÉMY A VÝPOČETNÍ SÍŤ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ TLUMIVKY V PROGRAMU ANSYS MECHANICAL APDL.....	59
OBR. 25 ROZLOŽENÍ TEPLoty NA CÍVKÁCH TLUMIVKY 2 mH	61
OBR. 26 ROZLOŽENÍ TEPLoty NA MAGNETICKÉM OBVODU TLUMIVKY 2 mH.....	62
OBR. 27 VEKTOROVÉ ZNÁZORNĚNÍ TEPELNÉHO TOKU TLUMIVKY 2 mH	62
OBR. 28 ROZLOŽENÍ TEPLoty NA CÍVKÁCH TLUMIVKY 4 mH	63
OBR. 29 ROZLOŽENÍ TEPLoty NA MAGNETICKÉM OBVODU TLUMIVKY 4 mH.....	64
OBR. 30 VEKTOROVÉ ZNÁZORNĚNÍ TEPELNÉHO TOKU TLUMIVKY 4 mH	64
OBR. 31 ZAKÓTOVÁNÍ ROZMĚRŮ OCELOVÝCH PLECHŮ A MAGNETICKÉHO OBVODU TLUMIVEK.....	65
OBR. 32 ZAKÓTOVÁNÍ ROZMĚRŮ OCELOVÝCH PLECHŮ A MAGNETICKÉHO OBVODU TLUMIVEK.....	66
OBR. 33 SKICA S KÓTAMI A POSTUPEM MODELOVÁNÍ KOSTER CÍVEK V PROGRAMU SOLIDWORKS.....	68
OBR. 34 SKICA S KÓTAMI A POSTUPEM MODELOVÁNÍ CÍVKY V PROGRAMU SOLIDWORKS	69
OBR. 35 SKICA S KÓTAMI A POSTUPEM MODELOVÁNÍ SPOJOVACÍ KONSTRUKCE V PROGRAMU SOLIDWORKS .	70
OBR. 36 SKICA S KÓTAMI A POSTUPEM MODELOVÁNÍ UCHYCOVACÍ PATKY V PROGRAMU SOLIDWORKS	71
OBR. 37 KONEKTOR ZAČÁTKŮ A KONCŮ VINUTÍ CÍVEK S JEHO KONTAKTEM.....	72
OBR. 38 KONEKTOR A JEHO KONTAKTY VÝVODŮ TERMISTORU	72
OBR. 39 POHLED ZEPŘEDU NA VÝSLEDNOU MECHANICKOU KONSTRUKCI TLUMIVEK SE SKRYTÝMI VODIČI.....	73
OBR. 40 PRAVÝ POHLED NA VÝSLEDNOU MECHANICKOU KONSTRUKCI TLUMIVEK SE SKRYTÝMI VODIČI	74
OBR. 41 NÁVRH VÝSLEDNÉ MECHANICKÉ KONSTRUKCE TLUMIVEK PRO JEJICH SÉRIOVOU VÝROBU.....	74
OBR. 42 SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ INDUKČNOSTI 3 FÁZOVÉ TLUMIVKY.....	76
OBR. 43 SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO NEPŘÍMÉ MĚŘENÍ MALÝCH ODPORŮ OHMVOU METODOU	77
OBR. 44 SCHÉMA ZAPOJENÍ MŮSTKOVÉHO MĚŘENÍ ODPORŮ WHEATSTONEOVÝM MŮSTKEM	77
OBR. 45 SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO NEPŘÍMÉ MĚŘENÍ MALÝCH ODPORŮ OHMVOU METODOU	78

TAB. 1 ANALYTICKÝ NÁVRH TLUMIVKY 2 mH.....	40
TAB. 2 ANALYTICKÝ NÁVRH TLUMIVKY 4 mH.....	42
TAB. 3 VLASTNOSTI POUŽITÝCH MATERIÁLŮ V TEPLTNÍ ANALÝZE	57
TAB. 4 POUŽITÉ HODNOTY PRO VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA ROZHRAŇÍCH	59
TAB. 5 POUŽITÉ ČINNÉ VÝKONOVÉ ZTRÁTY V TEPLTNÍ ANALÝZE	60
TAB. 6 ROZMĚRY TLUMIVEK, OCELOVÝCH PLECHŮ A MAGNETICKÉHO OBVODU.....	65

Úvod

Předkládaná diplomová práce je rozdělena do pěti hlavních kapitol a navazuje na bakalářskou práci s názvem „Vliv konstrukce magnetického obvodu na indukčnost a ztráty tlumivky“ vypracovanou studentem bakalářského studijního programu Ondřejem Kloudou. Bakalářská práce si kladla za cíl navrhnout dva prototypy třífázových tlumivek, kde každá má odlišnou indukčnost a rozsah proudového zatížení. Nejdůležitějším parametrem byla konstantní indukčnost jednotlivých fází v určitém pásmu tolerance v celém požadovaném rozsahu proudového zatížení. Dále také omezení celkových činných výkonových ztrát a s tím související oteplení a přirozené chlazení ve vyšší nadmořské výšce, kde jsou zhoršené ventilační podmínky. Tyto požadavky měly být splněny s ohledem na jednoduchost a finanční náklady při sériové výrobě. Avšak těchto požadavků nebylo docíleno v celém rozsahu proudového zatížení tlumivek. Tato diplomová práce si tedy klade za cíl dosáhnout těchto požadavků v celém rozsahu proudového zatížení a také navrhnout mechanické provedení tlumivek.

Praktická část diplomové práce byla z důvodu celosvětové pandemie koronaviru SARS-CoV-2 znemožněna, protože byl omezen pohyb osob, omezeny provozy dodavatelů potřebného materiálu a podniků potřebných pro konstrukci prototypů tlumivek. Z toho důvod bylo na základě vyhlášky děkana a po domluvě s vedoucím diplomové práce přistoupeno k náhradnímu řešení a to takovému, že bylo změněno zadání, kde provedení kontrolního měření na vzorku tlumivky bylo nahrazeno návrhem vhodné stahovací konstrukce tlumivky. Původní plán při možnosti osobní přítomnosti v laboratoři byl, když ne úplná konstrukce nových prototypů tlumivek, tak alespoň využít již zkonstruované prototypy tlumivek Ondřejem Kloudou během vypracovávání jeho bakalářské práce. Pak by z již zkonstruovaných prototypů tlumivek byly využity upravené kostry cívek, samotné navinuté cívky a magnetický obvod. Tato volba tedy omezila původně zamýšlenou a v této práci navrženou konstrukci tlumivek. Je zde tedy alespoň teoreticky navržena mechanická konstrukce prototypů tlumivek pro případnou sériovou výrobu.

První kapitola uvádí čtenáře do problematiky cívky, jejího chování ve stejnosměrném i střídavém obvodu, jakými prvky je tvořena, jaké jsou její druhy a konkrétní uplatnění v praxi. Následně je zmíněno chování a funkce tlumivky s uvedením několika konkrétních použití v praxi pro lepší představu využitelnosti.

V další druhé kapitole je přehledově popsána myšlenka metody konečných prvků a důvod jejího dnešního širokého nasazení a použití v programech pro výpočty nejrůznějších matematických a fyzikálních úloh.

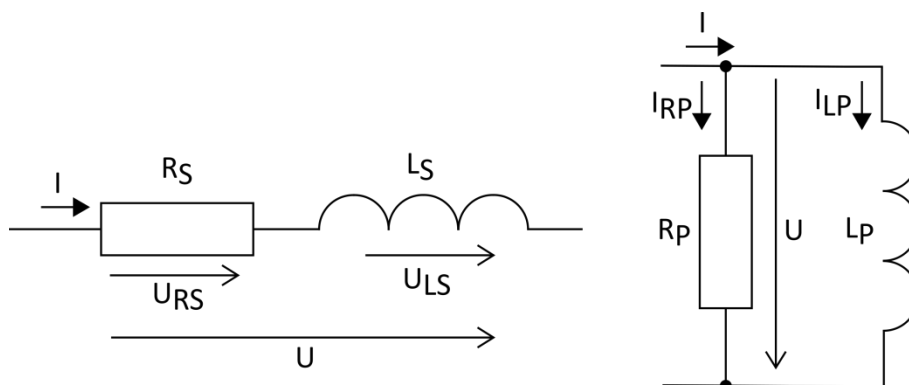
Třetí kapitola pojednává o možnostech a schopnostech programu ANSYS Maxwell, jenž byl zvolen a použit pro ověření analytického návrhu třífázové tlumivky.

Čtvrtá kapitola se zabývá mechanickou konstrukcí, teplotní analýzou v programu ANSYS Workbench, analytickým návrhem, ověřením analytického návrhu a úpravou parametrů třífázových tlumivek na základě výpočtů metodou konečných prvků provedených v programu ANSYS Maxwell.

Poslední kapitola je věnována plánovanému kontrolnímu měření indukčnosti cívek tlumivek v jednotlivých fázích, oteplení, rezistanci vinutí a činných výkonových ztrát navržených a zkonstruovaných prototypů třífázových tlumivek pro ověření toho, zda bylo skutečně dosaženo požadavků daných zadavatelem.

1 Cívka

Cívka je dvojpólová pasivní elektronická součástka ze spirálovitě či šroubovicovitě navinutého vodiče s N závity, jež je v ideálním případě charakterizována pouze vlastní indukčností. To je však možné pouze v ideálním případě, což znamená, že skutečná cívka má také rezistanci, která je charakteristická pro látku vodiče, z něhož je cívka navinuta. Vzorec (1) pro výpočet statické vlastní indukčnosti lze použít pro malé průřezy vodiče cívky v prostředí s konstantní permeabilitou, což znamená i konstantní indukčnost bez ohledu na velikost proudu cívkou. Naopak v prostředí, ve kterém není permeabilita konstantní (např. feromagnetika), není ani indukčnost konstantní a je tedy závislá na proudu cívkou, a proto se používá také dynamická (diferenciální) vlastní indukčnost (2). Cívka má také schopnost akumulovat energii v magnetickém poli, které vzniká v jejím okolí při průchodu proudu cívkou a lze ji vypočítat pro magneticky měkké lineární izotropní prostředí podle rovnice (3). Náhradní elektrické schéma skutečné cívky (Obr. 1) lze zobrazit jako sériové či paralelní spojení ideální cívky a ideálního rezistoru, která jsou vzájemně duální.



Obr. 1 Náhradní elektrické schéma cívky sériové (vlevo) a paralelní (vpravo)

$$L_S = N \cdot \frac{\Phi}{I} = \frac{\Psi}{I} \quad (1)$$

$$L_D = N \cdot \frac{d\Phi}{dI} = \frac{d\Psi}{dI} \quad (2)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot dV \quad (3)$$

1.1 Cívka ve stejnosměrném obvodu

Zapojení cívky v elektrickém obvodu, který je napájen stejnosměrným proudovým či napěťovým zdrojem způsobí, že reaktance je nulová a rezistance nenulová. Reaktance je nulová, protože je nulová i frekvence napětí či proudu v tomto elektrickém obvodu. Pokud bychom uvažovali reálnou cívku s náhradním schématem podle Obr. 1 vlevo, je v ustáleném stavu ve stejnosměrném obvodu její chování shodné s rezistorem. V přechodovém stavu při přechodovém ději mezi dvěma ustálenými stavy, který může nastat připojením nebo odpojením od stejnosměrného napájecího zdroje napětí (Obr. 2) či proudu dochází k nárůstu nebo poklesu velikosti proudu v elektrickém obvodu. Kvůli této změně dochází i ke změně magnetického indukčního toku cívky a podle Lenzova zákona (4) se na cívce indukuje elektromotorické napětí. Napětí je takové orientace, aby působilo jako protinapětí a vyvolávalo v uzavřeném obvodu indukovaný proud, který vytváří magnetický indukční tok působící proti magnetickému indukčnímu toku, který tento celý proces způsobil. Lenzův zákon indikuje tuto orientaci indukovaného napětí jako protinapětí pomocí znaménka minus. Jelikož musí platit Kirchhoffovy zákony i během přechodového děje, objevuje se okamžitě po připojení napěťového stejnosměrného zdroje na cívce napětí a s tím, jak v elektrickém obvodu narůstá proud, tak napětí na cívce klesá a na rezistoru narůstá. Napětí je tedy u cívky stavovou a proud stavovou veličinou, vztah pro jejich výpočet je v diferenciálním (5) a integrálním (6) tvaru. Nárůst i pokles obou veličin, jak je patrné z rovnic (8) a (9), probíhá po exponenciále, což vychází z řešení obyčejné lineární diferenciální rovnice 1. řádu s konstantními koeficienty (7) pro elektrický obvod na Obr. 2.

$$u_i = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(L \cdot I)}{dt} = -L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

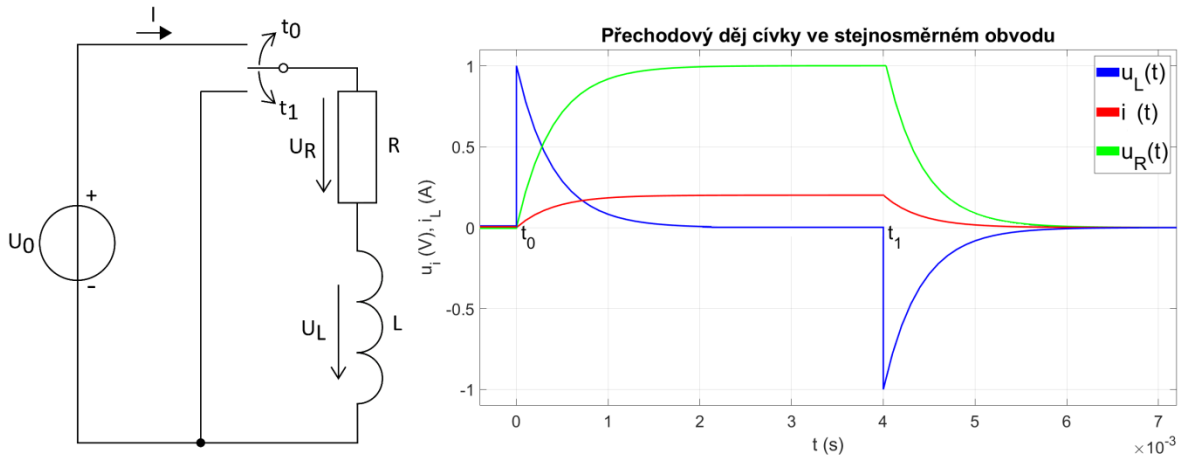
$$u_L = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d(L \cdot I)}{dt} = L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t u_L \cdot dt + i_L(0) \quad (6)$$

$$U_0 = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

$$i(t) = \frac{U_0}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (8)$$

$$u_L(t) = U_0 \cdot (e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (9)$$



Obr. 2 Elektrické schéma stejnosměrného obvodu se skutečnou cívkou (vlevo) a průběhy veličin během přechodového děje (vpravo)

1.2 Cívka ve střídavém obvodu

V případě připojení ideální cívky ke zdroji střídavého harmonického napětí o určité frekvenci se bude projevovat pouze induktivní reaktance někdy též nazývaná indukance, která brání průchodu střídavého harmonického proudu. Ideální cívka způsobuje fázové zpoždění proudu za napětím o fázový úhel φ rovný 90° . U skutečné cívky brání průchodu střídavého harmonického proudu kromě induktivní reaktance také rezistance vinutí cívky. Induktivní reaktance tvoří imaginární a rezistance reálnou část komplexní veličiny impedance (10). Existence rezistance způsobí, že fázový úhel φ bude vždy menší než 90° (viz Obr. 3) a do oněch 90° vzniká doplňkový úhel δ nazývaný ztrátový. Ztrátový úhel poté slouží u sériového a paralelního náhradního elektrického schématu cívky pro výpočet ztrátového činitele (rovnice (11) a (12)) nebo jeho převrácené hodnoty zvané činitel jakosti (rovnice (13) a (14)). Vektorový diagram veličin napětí a proudu pro sériové i paralelní náhradní elektrické schéma cívky je znázorněn na Obr. 4, kde je vyznačen fázový i ztrátový úhel.

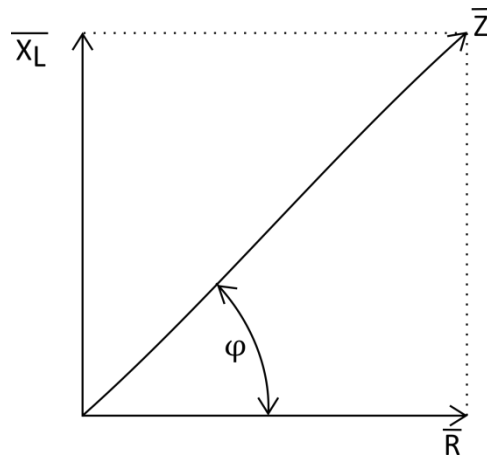
$$Z = R + j \cdot X_L = R + j \cdot \omega \cdot L = \rho \cdot \frac{1}{S} + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (10)$$

$$\operatorname{tg}\delta_S = \frac{U_{RS}}{U_{LS}} = \frac{R_S \cdot I}{\omega \cdot L_S \cdot I} = \frac{R_S}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_S} \quad (11)$$

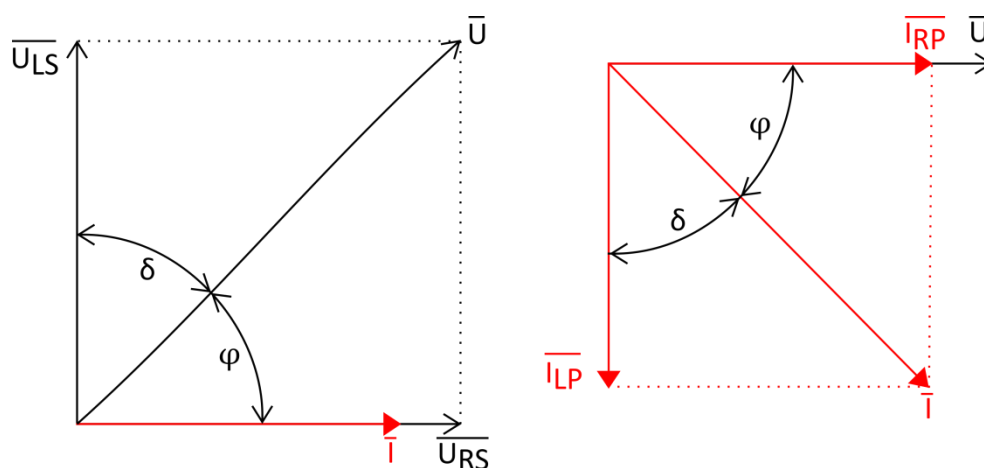
$$\operatorname{tg}\delta_P = \frac{I_{RP}}{I_{LP}} = \frac{\frac{U}{R_P}}{\frac{U}{\omega \cdot L_P}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_P}{R_P} \quad (12)$$

$$Q_S = \frac{1}{\operatorname{tg}\delta_S} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_S}{R_S} \quad (13)$$

$$Q_P = \frac{1}{\operatorname{tg}\delta_P} = \frac{R_P}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_P} \quad (14)$$



Obr. 3 Vektorový diagram impedance cívky



Obr. 4 Vektorový diagram cívky pro náhradní elektrické schéma sériové (vlevo) a paralelní (vpravo)

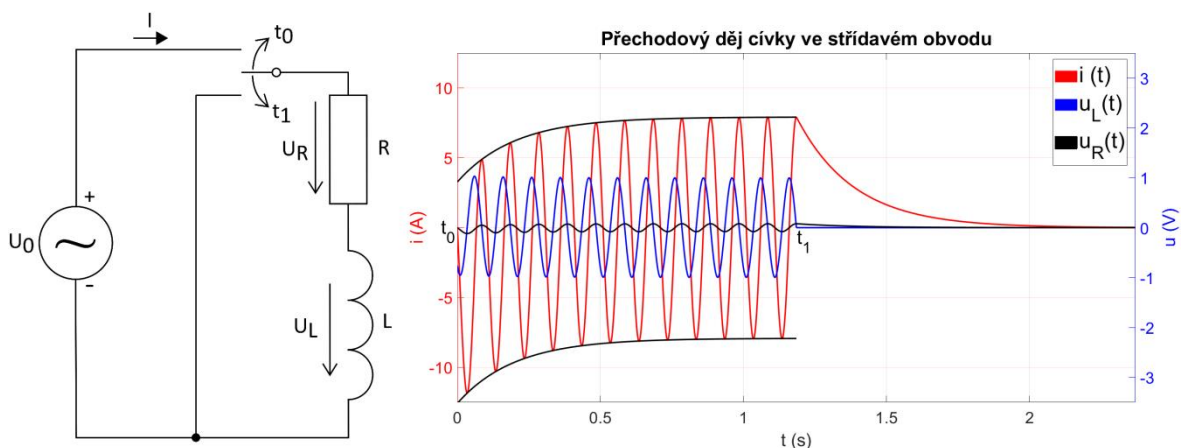
V ustáleném stavu je při napájení střídavým harmonickým napětovým zdrojem i průběh napětí a proudu cívkou harmonický a jsou vzájemně fázově posunuty o fázový úhel

φ . Během přechodového děje v přechodovém stavu mezi dvěma ustálenými stavy je také průběh napětí i proudu cívky harmonický, ale proud je superponován na exponenciálu (viz Obr. 5). V případě, že připojení harmonického zdroje napětí U_0 bude v čase t_0 , v němž dosahuje napětí na cívce u_L amplitudy, tak přechodový děj nenastane, protože amplitudě napětí na cívce odpovídá nulový proud. Tyto průběhy opět vychází z řešení obyčejné lineární diferenciální rovnice 1. řádu s konstantními koeficienty (15), která se v porovnání s rovnicí (7) liší tím, že napětí a proud je harmonický. Vztah (16) je řešením této diferenciální rovnice a vztah (17) vychází z rovnice (5), kde za proud je dosazen vztah (16).

$$U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha) = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (15)$$

$$i(t) = \frac{U_0}{|Z|} \cdot (\sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (16)$$

$$u_L(t) = \frac{U_0}{|Z|} \cdot (L \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) + R \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (17)$$



Obr. 5 Elektrické schéma střídavého obvodu se skutečnou cívkou (vlevo) a průběhy veličin během přechodového děje (vpravo)

1.3 Prvky cívek

Cívka se skládá ze tří prvků:

- vinutí
- kostry
- magnetického obvodu (jádra).

Vinutí je obvykle tvořeno vodičem kruhového, oválného, méně často čtvercového či obdélníkového průřezu, pro vysoké frekvence vysokofrekvenčním lankem, pro velké proudy pásovinou a v elektronice cestou vhodného tvaru na DPS. U transformátorů je často vinutí na straně nízkého napětí fóliové. Materiál vodiče je nejčastěji měď, méně často hliník. Velikost průřezu je volena podle trvalého proudu a proudové hustoty, s čímž také souvisí činný ztrátový výkon vinutí a jeho oteplení. Vodiče používané na vinutí jsou většinou pokryty tenkou vrstvou průhledného elektroizolačního laku, v určitých aplikacích je izolace tvořena silnější vrstvou izolantu (PVC, polyetylen, atd.) naneseného extrudérem. V některých případech je pro zvýšení elektrické pevnosti ještě tato izolace zesílena např. slídovým papírem, polyesterovou folií. Vinutí je navinuto spirálovitě (šroubovicovitě, křížově, segmentově, komorově) v jedné, či více vrstvách, do tvaru solenoidu nebo toroidu s kruhovým, oválným, čtvercovým nebo obdélníkovým tvarem průřezu. Často je vinutí impregnováno impregnačním lakem nebo navíc zalito zalévací hmotou, což zajišťuje jeho soudržnost, zvýšení elektrické pevnosti, zlepšení odvodu ztrátového tepla vzniklého průchodem proudu vinutím, zamezení vniku vlhkosti a nečistot, které by mohly s časem způsobit porušení izolace. Relativně nová technologie výroby vinutí je jeho odlévání (viz [15]), které má proti vinutému vinutí lepší činitel plnění, což při shodné velikost proudu oběma vinutími sníží činné výkonové ztráty (zde není myšleno odlévání vinutí klecových kotev nakrátko).

Kostra slouží jako nosný prvek vinutí, která zajišťuje jeho soudržnost, pokud není vinutí ještě navíc impregnováno impregnačním lakem či zalito zalévací hmotou. Je vyrobena z nemagnetického materiálu, dnes především z termoplastů (PBT, PET, PPA, PI, PA, LCP) a reaktoplastů (PF, bakelit), méně často z tvrzené lepenky (prešpán) či tvrzeného papíru (kartit, pertinax, textit). Kostry z termoplastů a reaktoplastů mohou být ještě vyztuženy skelnými vlákny pro zvýšení mechanické odolnosti a odolnosti vůči ztrátovému teple, které vzniká ve vinutí průchodem proudu. Plastové jsou vyráběné vstřikovacím lisem jako jednolitě, ty z tvrzené lepenky či papíru jsou do požadovaného tvaru seskládány

z více částí, které jsou poté slepeny. Obecně je složena ze dvou čel a tubusu, který čela spojuje. Čela jsou tvaru mezikruží nebo s vnějším tvarem obdélníkovým a otvorem podle tvaru průřezu magnetického obvodu, na kterém bude nasazena. Tvar průřezu tubusu je kruhový, obdélníkový nebo jiný podle tvaru průřezu magnetického obvodu. Čela mají otvory či zářezy pro provléknutí nebo zatlačení začátků a konců vinutí. Ještě mohou čela obsahovat pájecí očka či piny (kontakty), ke kterým se připájí začátky a konce vinutí cívek. Na tubusu může být několik přepážek pro vzájemné oddělení jednotlivých vinutí. Kostry jsou sériově vyráběny pro standardizované průřezy magnetický obvodů s různými počty závitů a výškou vinutí.

Magnetický obvod tvoří prostředí pro vedení a soustředění magnetického indukčního toku. Může být celistvý nebo přerušovaný mezerou, která je vyplněna obvykle vzduchem nebo jinou látkou s nízkou relativní permeabilitou. Látky dobře magneticky vodivé, používané pro zhotovení magnetického obvodu, jsou feromagnetické a ferimagnetické, protože dosahují vysokých hodnot relativní permeability. Díky tomu lze ve spojení s vinutím protékaným proudem dosáhnout vyšší indukčnosti a magnetické indukce. Vinutí je na magnetickém obvodu přímo navinuto nebo je navinuté na kostře a pak je společně s kostrou na magnetický obvod nasazeno. Magnetický obvod, na kterém je umístěno vinutí protékané stejnosměrným proudem, může být zhotoven z feromagnetika jako jednolitý masivní nebo listěný z jednotlivých plechů, protože se do něho neindukují vířivé proudy a nedochází v něm k činným výkonovým ztrátám vířivými proudy. Listěný magnetický obvod je složen ze vzájemně, lakem či oxidem, izolovaných feromagnetických plechů požadovaného tvaru, který je standardizovaný (E, I, U, M, B, C, L) nebo specifický pro dané použití. Plechy složené do požadovaného tvaru jsou následně staženy mechanickou konstrukcí tak, aby tvořily kompaktní celek. Speciálním provedením listěných magnetických obvodů jsou vinuté dělené nebo UNICORE jádra, které jsou vyráběny ve standardizovaných, specifických (viz výše) a toroidních tvarech. V případě vinutí protékaného střídavým harmonickým proudem se vlivem nenulové frekvence tohoto proudu a nenulové elektrické vodivosti magnetického obvodu indukují vířivé proudy, jež v magnetickém obvodu způsobují činné výkonové ztráty. Navíc vlivem existence magnetické hystereze feromagnetik a jejich střídavé magnetizace dochází k činným výkonovým ztrátám hysterezním, které jsou úměrné ploše hysterezní smyčky. Uvažování pouze těchto činných výkonových ztrát je značně zjednodušené, protože ještě vznikají činné výkonové ztráty přídavné, které jsou závislé na složení, mikrostruktuře a

metalurgickém zpracování feromagnetika. Zhotovení magnetického obvodu s vinutím protékáným střídavým harmonickým proudem je závislé na konkrétním uplatnění. Pro síťovou frekvenci proudu je většinou listěný, čímž dojde k omezení činných výkonových ztrát vířivými proudy. Přestože objem listěného a masivního magnetického obvodu je ve výsledku shodný, činné výkonové ztráty vířivými proudy se přibližně sníží tolikrát, kolik je potřeba listů plechu, pro dosažení shodného objemu. Pro proudy vysokofrekvenční jsou magnetické obvody zhotoveny v různých tvarech jako masivní z feromagnetických látek (feritů), které mají vysokou rezistanci, což snižuje činné výkonové ztráty vířivými proudy. Výpočet vířivých, hysterezních a přídavných měrných činných výkonových ztrát na jednotku kilogramu lze provést podle empirických Steinmetzových rovnic (18), (19) a (20). Koeficienty k_{VP} , k_H a k_P lze dopočítat na základě závislosti měrných činných výkonových ztrát na magnetické indukci pro jednu či více frekvencí, která je uvedena v katalogu feromagnetika (více v [49]).

$$\Delta p_{VP} = \frac{\sigma \cdot (\pi \cdot f \cdot B_m \cdot t_f)^2}{6 \cdot \rho_F} = k_{VP} \cdot (f \cdot B_m)^2 \quad (18)$$

$$\Delta p_H = k_H \cdot f \cdot B_m^2 \quad (19)$$

$$\Delta p_P = k_P \cdot (f \cdot B_m)^{1,5} \quad (20)$$

$$\Delta p = \Delta p_{VP} + \Delta p_H + \Delta p_P \quad (21)$$

1.4 Druhy cívek

Cívky bez jádra (magnetického obvodu) dosahují nižší hodnoty indukčnosti, v řádech mikrohenry, výjimečně milihenry. Je to způsobeno tím, že obvykle pracují v plynném prostředí s relativní permeabilitou, v řádech jednotek, a jsou navinuty jako samonosné bez kostry nebo na kostru z neferomagnetické látky. Neferomagnetické látky mají v porovnání s feromagnetickými látkami mnohem nižší relativní permeabilitu, která je zároveň vyšší než jedna. Kvůli nízké relativní permeabilitě jsou tyto látky špatně magneticky vodivé, což vede na nízkou magnetickou indukci, magnetický indukční tok a tedy i indukčnost cívky. Díky tomu dosahují nízkých činných výkonových ztrát i v obvodech s frekvencemi v řádech stovek megahertzů, ve kterých se hojně používají. Výhodou je lineární závislost magnetizační charakteristiky, kde vlivem neferomagnetických látek nedochází k přesycení

a tedy s proudem se indukčnost nemění a je konstantní. Kromě navinutí, jako samonosné bez kostry nebo na kostře, jsou vytvářeny i na deskách plošných spojů leptáním, ve tvaru závitů podle předlohy.

Cívky s jádrem (magnetickým obvodem) dosahují indukčnosti v řádech desítek až stovek milihenry, případně až jednotek henry. Mohou být navinuty přímo na jádře nebo na kostře z neferomagnetického materiálu, která je poté na jádro nasunuta. Jádro je z feromagnetické látky, která má relativní permeabilitu v řádech jednotek až stovek tisíc, a proto je velice dobře magneticky vodivá. Díky tomu může být vyšší magnetická indukce, magnetický indukční tok a tedy i vyšší indukčnost. Zde je nevýhodou přesycování feromagnetické látky, což vede na nelineární průběh magnetizační charakteristiky. Kvůli tomu se s proudem indukčnost mění a není konstantní. To lze částečně eliminovat zařazením vzduchové mezery do jádra, např. tak, že jádro částečně vysuneme z kostry s vinutím.

1.5 Použití cívek

Cívky mají velice široké spektrum použití, zde jsou uvedeny některé z elektrických strojů, přístrojů, zařízení a součástek, kde jsou používány: transformátory; relé; stykače; jističe; proudové chrániče; střídavé a stejnosměrné motory; čerpadla; startéry; alternátory; servomotory; ventilátory; tlumivky; reaktory; elektromagnetické ventily; reproduktory; mikrofony; analogové voltmetry, ampérmetry, ohmometry, galvanometry, wattmetry, kmitoměry, otáčkoměry, osciloskopy; elektromagnety; antény; měniče; tlumivkové a elektronické předřadníky; indukční snímače; transduktory a mnoho dalších.

Výše zmiňované mohou být ještě součástí jednodušších či komplexnějších zařízení, která mají specifickou funkci.

1.6 Tlumivka

Tlumivka je také cívka, ale jak již z jejího názvu plyne, její hlavní funkcí je tlumení skokových změn a velikosti proudu v elektrickém obvodu. Tyto změny odpovídají přechodovým dějům, kdy se cívka změně proudu brání, a dalo by se říci, že je její chování analogické se setrvačником. Díky tomu, že se ve střídavém obvodu kromě její rezistance projevuje ještě její induktivní reaktance závislá na velikosti indukčnosti a frekvenci, má

tlumivka pro vyšší frekvence střídavého harmonického proudu vyšší induktivní reaktanci, respektive impedanci. To způsobí, že v elektrickém obvodu napájeným střídavým harmonickým zdrojem napětí se stejnou amplitudou o vyšší frekvenci, je amplituda proudu nižší, než by byla při nižší frekvenci napájecího zdroje, což odpovídá funkci filtru dolní propust (integrační článek). Tedy amplituda proudu s nižší frekvencí je tlumena méně, než u proudu s vyšší frekvencí.

1.6.1 Použití tlumivek

Filtrační tlumivka obvykle tvoří ve spojení s kondenzátorem sériový rezonanční LC filtr jehož rezonanční frekvence je rovna frekvenci harmonické proudu, kterou chceme odfiltrout. Při rezonanci je totiž komplexní veličina impedance tohoto filtru rovna pouze její reálné složce rezistanci, což je minimální hodnota, která pro danou harmonickou proudu znamená téměř zkrat. Připojuje se poblíž zdroje těchto harmonických proudu (spínaný zdroj, měnič, aj.) mezi fázový a pracovní vodič. Nejvyšší amplitudu mají obvykle harmonické řádu 3., 5., 7., 11. a 13., na které jsou LC filtry naladěny. Pro jiné frekvence, než je rezonanční frekvence LC filtru slouží kondenzátor zároveň jako zdroj kapacitního jalového výkonu, což je jeho přirozenou vlastností a s výhodou je toho využíváno ke kompenzaci induktivního jalového výkonu, který často v distribuční síti převažuje. Odfiltrování těchto harmonických proudu je důležité, protože způsobují deformaci tvaru napětí napájecí sítě, vyšší výkonové ztráty, rušení telekomunikačních zařízení, atd. A navíc normy stanovují meze harmonických proudu.

Vyhlazovací tlumivka se používá ve stejnosměrných obvodech pro potlačení harmonických proudu superponovaných na stejnosměrnou složku, což snižuje zvlnění proudu a vyhlazuje jeho průběh. Dále při zkratu omezuje strmost nárůstu proudu. Ve výkonové elektronice je součástí pulzních měničů, proudového někdy i napěťového stejnosměrného meziobvodu nepřímého měniče frekvence nebo u pohonů se stejnosměrným motorem. U pohonů se stejnosměrným motorem tlumivka omezuje zvlnění proudu a tím i parazitní pulzační momenty motoru, které způsobují jeho vibrace.

Zhášecí tlumivka nebo také Petersenova zhášecí tlumivka se používá k omezení (kompenzaci) poruchových kapacitních zemních proudů v elektrické distribuční (přenosové) izolované soustavě vysokého napětí (v ČR 22 kV a 35 kV), kde je izolovaný nulový bod vinutí transformátoru zapojený do hvězdy. Pokud v takovéto síti dojde

k poruše, kdy se vodivě spojí vodič jedné fáze se zemí, jedná se o jednofázové zemní spojení. Při této poruše neteče zkratový proud, ale menší kapacitní proud, který je způsoben parazitními kapacitami fázových vodičů vůči zemi. Napětí nepoškozených fázových vodičů vůči zemi se může zvýšit až na sdruženou hodnotu fázového napětí, což může při nedostatečně dimenzované elektrické pevnosti izolace prvků soustavy vést k jejímu poškození. Takovouto soustavu lze i při této poruše provozovat nadále díky zařazení zhášecí tlumivky mezi nulový bod vinutí transformátoru a zem, čímž se z této soustavy stane neúčinně uzemněná. Provozujeme ji takto do doby, než je porucha lokalizována a odstraněna. Laděním této tlumivky se snažíme dosáhnout paralelní rezonance s parazitními kapacitami. Pokud by v místě spojení došlo k zapálení elektrického oblouku, tak zhášecí tlumivka by ho zhasila. V ideálním případě bude kapacitní a induktivní proud v protifázi a výsledný proud nulový. Ve skutečnosti poteče proud daný svodem parazitních kapacit a rezistancí tlumivky.

Kompenzační tlumivka slouží k dodávání induktivního jalového výkonu do elektrické distribuční (přenosové) soustavy, ve které aktuálně převažuje kapacitní jalový výkon, protože je snahou udržet účinník induktivního charakteru v rozmezí 0,95 až 1. Jalový výkon nekoná žádnou užitečnou práci, ale je potřeba pro funkci např. střídavých motorů, transformátorů a kondenzátorů pro vytvoření magnetického a elektrického pole. U některých zařízení (výkonové měniče) není pro jejich funkci potřeba a je to z hlediska distribuční soustavy nežádoucí vlastnost. Aby jalový výkon nemusel být přenášen celou distribuční soustavou a omezily se v ní činné výkonové ztráty, je dodáván zařízením, která ho vyžadují, lokálně. Kompenzace může být: individuální přímo na svorkách zařízení, skupinová v rozvaděči pro více zařízení, centrální v rozvodně pro větší průmyslové závody nebo u rozlehlých průmyslových závodů kombinace předešlých. Pokud je kompenzační tlumivka připojena stále mluvíme o statické, v případě nestálého připojení o dynamické kompenzaci. Většinou probíhá kompenzace součinností tlumivek a kondenzátorů, které jsou podle aktuální potřeby připojované či odpojované.

Odušovací tlumivka se používá pro potlačení symetrického (protifázového, diferenčního) rušení nebo nesymetrického rušení. Tlumivka pro potlačení symetrického rušení má jedno vinutí navinuté jako samonosné nebo na kostře z nemagnetického materiálu tvořící vzduchovou tlumivku anebo navinuté na feritovém toroidním či tyčovém magnetickém obvodu. Pracovní i rušivý proud jí teče ve shodném směru, ale pro ten rušivý

má tlumivka vysokou impedanci. Pro potlačení nesymetrického (soufázového, souhlasného) rušení se taková tlumivka nazývá proudově kompenzovaná. Taková tlumivka má na toroidním feritovém magnetickém obvodu dvě vinutí případně čtyři, která jsou navinuta ve shodném smyslu a průchodem pracovního proudu se jimi vytvořené magnetické indukční toky vzájemně vyruší, což znamená minimální impedanci. Naopak je tomu pro proud rušivý, kdy se magnetické indukční toky sčítají a impedance je vysoká.

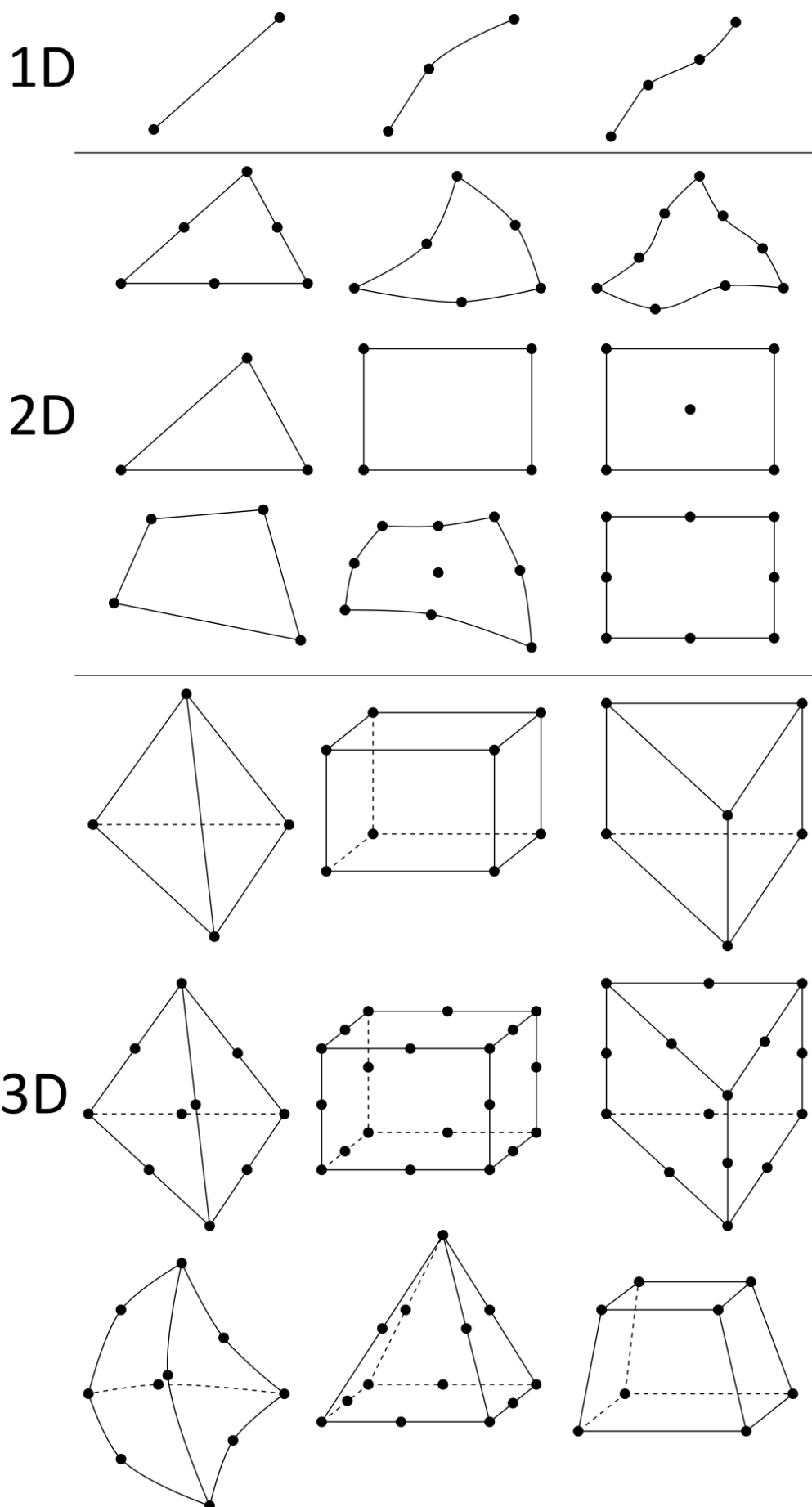
2 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (dále jen MKP, angl. FEM) je jedna z možností numerického řešení matematických a fyzikálních úloh, jejíž počátky sahají na začátek 40. let 20. století, kdy byla prvně popsána nezávisle na sobě v roce 1941 inženýrem Alexanderem Hrennikoffem a matematikem Richardem Courantem roku 1942. MKP je zvláštní případ Galerkinovy variační metody, ve které jsou speciálně zvoleny báze funkce vektorového prostoru funkcí konečné dimenze. S rozvojem, rozšířením a zvyšováním výpočetního výkonu výpočetní techniky se uplatnění této metody s časem značně navyšovalo a dnes je nejpoužívanější numerickou metodou. V porovnání s přesným analytickým řešením je výpočet metodou konečných prvků vždy zatížen určitou chybou a jedná se tedy o výpočet přibližný. Podnětem pro její vznik byla potřeba řešení složitějších úloh, které je obtížné či zcela nemožné řešit analyticky, protože tak lze řešit pouze některé, zpravidla jednoduché úlohy (jednoduchá geometrie, značná zjednodušení, atd.).

Principem je, že spojitá úloha je převedena na diskrétní úlohu, kterou lze numericky vždy vyřešit. Popis spojitě úlohy diferenciálními či parciálními diferenciálními rovnicemi s okrajovými (Dirichletovy, Neumannovy) a počátečními podmínkami se nazývá silná, někdy klasická formulace, která nelze vždy analyticky vyřešit a nemá tedy vždy silné (klasické) řešení. Takto popsanou úlohu je ale možné v oblasti, kde hledáme řešení, vyřešit přibližně (aproximovaně) numericky pomocí MKP. Oblast, ve které hledáme řešení diferenciálních či parciálních diferenciálních rovnic rozdělíme na konečný počet menších podoblastí tzv. prvků, které původní oblast v ideálním případě zcela pokryjí. Tato operace se nazývá diskretizace řešené oblasti, v případě trojúhelníkových prvků mluvíme o triangulaci. Pojem triangulace se někdy používá i v případě, že prvky nejsou trojúhelníkové. Diskretizací vznikne výpočetní síť tvořená prvky, které jsou vzájemně spojeny vrcholy tzv. uzlovými body (uzly). V těchto, a v závislosti na tvaru prvku (viz

Obr. 6), i jiných bodech ležících na prvcích (středy hran prvků, apod.) hledáme řešení. V ostatních bodech lze také najít řešení, ale pouze přibližné (aproximované). Silná formulace spojité úlohy je pomocí MKP převedena na slabou (variační) formulaci, což je ekvivalent původních diferenciálních či parciálních diferenciálních rovnic. Tato slabá formulace je převedena do diskrétní podoby. Přibližné řešení je pak lineární kombinace lineárně nezávislých vhodně zvolených bázových funkcí, což je obvykle polynom určitého stupně, kde jeho koeficienty jsou neznámé, které hledáme. Koeficienty zjistíme dosazením souřadnic uzlů do bázových funkcí pro každý uzel prvků. Pak vznikne pro každý uzel soustava algebraických rovnic konečného počtu, kterou když vyřešíme, získáme koeficienty bázových funkcí pro jednotlivé uzly. Po nalezení koeficientů bázových funkcí následuje ještě výpočet koeficientů lineární kombinace (jejich hodnota odpovídá hledané veličině v uzlech prvků), které když nalezneme, získáme již přibližné řešení. Jejich nalezení vychází ze slabé formulace. Tím vznikne soustava algebraických rovnic konečného počtu, kterou lze zapsat v maticovém tvaru. Levá strana je součinem tzv. matice tuhosti (název pochází z výpočtů mechaniky) a koeficientů lineární kombinace. Pravá strana je tzv. vektor zatížení (název opět vychází z výpočtů mechaniky). Prvky matice tuhosti a vektoru zatížení jsou vypočteny ze vzorců vycházejících ze slabé formulace a bázových funkcí. Matice tuhosti je díky vhodné volbě bázových funkcí symetrická, řídká, pásová a pozitivně definitní. To vede na nižší nároky na velikost paměti výpočetní techniky, snazšímu a rychlejšímu výpočtu soustavy algebraických rovnic některou z mnoha metod výpočtu (iterační, přímé, aj.). Když tuto matici vyřešíme, tak získáme koeficienty lineární kombinace, čímž získáme i přibližné řešení přesného řešení.

V závislosti na rozměru (dimenzi) oblasti (1D, 2D, 3D), ve které hledáme řešení, ji můžeme diskretizovat různými tvary prvků. Tyto prvky mají různý počet uzlů, čemuž také odpovídají tvary bázových funkcí. Pro lepší pokrytí řešené oblasti se v některých případech namísto lineárních stran prvků používají prvky s různě zakřivenými stranami. Sousedící prvky mají buď společný jeden vrchol, jednu stranu či stěnu, anebo jsou vzájemně disjunktní (neprotínají se). Jak je vidět na Obr. 6 prvky mohou být 1D (obecná křivka), 2D (rovinný geometrický obrazec) či 3D (prostorový geometrický obrazec). Pro vyšší přesnost řešení diskretizujeme řešenou oblast více prvky nebo prvky s více uzly anebo volíme jiné bázové funkce.



Obr. 6 Tvary prvků používaných pro diskretizaci řešené oblasti

3 Program ANSYS Maxwell

Soubor programů ANSYS Electronics pro řešení elektromagnetických polí, elektromagnetické kompatibility a dalšího, obsahuje kromě mnoha jiných i ANSYS Maxwell, který se používá pro řešení stacionárního a nestacionárního nízkofrekvenčního elektromagnetického pole, jak ve 2D, tak i 3D. Výpočet úplné soustavy Maxwellových rovnic, které popisují obecně elektromagnetické pole, jsou v Maxwellovi provedeny pomocí metody konečných prvků pro ustálené i přechodové stavy. Na výběr jsou řešiče pro řešení konkrétní problematiky: elektrostatické pole, stacionární elektrické pole, nestacionární elektrické pole v časové (přechodové stavy) i frekvenční (ustálené stavy) oblasti, magnetostatické pole, nestacionární magnetické pole bez pohybu ve frekvenční oblasti (ustálené stavy), nestacionární magnetického pole s pohybem v časové oblasti (přechodové stavy). Pro pole elektrostatické, stacionární elektrické, nestacionární elektrické v časové (přechodové stavy) i frekvenční (ustálené stavy) oblasti řešič primárně vypočte skalární elektrický potenciál φ a z něho jsou počítány ostatní veličiny pole a veličiny odvozené. Pro pole magnetostatické a nestacionární magnetické pole s pohybem v časové oblasti (přechodové stavy) řešič primárně vypočte intenzitu magnetického pole H a proudovou hustotu J , pro pole nestacionární magnetické bez pohybu ve frekvenční oblasti (ustálené stavy) primárně vypočte intenzitu magnetického pole H a z těchto veličin jsou opět počítány ostatní veličiny pole a odvozené veličiny. Umožňuje řešit výpočty pro netočivé i točivé elektrické stroje, aktuátory, senzory, permanentní magnety, tlumivky, kondenzátory, atd. Speciálně pro rychlé výpočty elektrických a mechanických parametrů točivých elektrických strojů slouží program ANSYS RMaxprt, který obsahuje několik předdefinovaných strojů. Pro netočivé elektrické stroje existuje obdobný program ANSYS PExprt. Výpočty v těchto programech jsou provedeny analyticky velice rychle a zpřesnění finálního modelu může být provedeno metodou konečných prvků v programu ANSYS Maxwell. Veškeré zadávané hodnoty při definování modelu je možné zadávat pomocí vlastně vytvořených proměnných (parametrů), což je výhodné při potřebě změny těchto hodnot, protože proměnné jsou přehledně v jedné tabulce. Dále lze tyto parametry využít pro zjednodušení a zefektivnění simulace, kdy je během ní automaticky bez vnějšího zásahu např. s lineárním krokem v zadaném rozmezí, měněna velikost parametru. Parametrem mohou být rozměry, počty závitů, amplituda proudu či napětí atd. Tvarově složitější 2D i 3D model lze vytvořit nejprve v dvoj- či trojrozměrném prostoru v nějakém z 2D (AutoCAD) či 3D CAD (Solid Edge, SolidWorks, CATIA, NX, Autodesk Inventor,

aj.) modelovacích programů a poté tento model importovat ve standardním formátu do prostředí ANSYS Maxwell. Zohledňuje, zdali je magnetický obvod masivní či listěný, vodiče masivní či slaněné, materiál nelineární definovaný magnetizační charakteristikou, anizotropní, nehomogenní či teplotně závislý. Výsledky simulace lze zobrazit ve: 2D liniových grafech; 3D grafech; v podobě barevné mapy s izoliniemi, izopásmy či izoplochami na ploše nebo povrchu modelu; ve 2D i 3D grafech vektorových polí nebo matici výsledků. Barevné mapy lze animovat v závislosti na čase nebo některé z vlastně vytvořených proměnných. Dostupná je také kalkulačka, pomocí které můžeme použitím matematických operací a veličin vypočtených řešičem vypočítat požadované veličiny. Požadované veličiny lze počítat v geometrických útvarech, které jsou součástí modelu anebo v pomocných geometrických útvarech, které jsou vytvořeny dodatečně právě pro tento výpočet. Všechna vypočtená data a grafy lze exportovat pro zpracování či použití v jiných programech. Při potřebě komplexního zkoumání a simulace vzájemného působení fyzikálních jevů z různých oblastí (mechanika, termika, elektromagnetismus) je možné k jejich propojení využít programu ANSYS Workbench, který propojuje širokou škálu programů ANSYS. To umožňuje velice blízké přiblížení se skutečnosti a podrobné zkoumání konkrétní úlohy, což je výhodné pro dosažení optimálního návrhu např. elektrických strojů. Podporuje také adaptivní síťování, což znamená, že výpočetní síť je v průběhu výpočtu na základě nejvyšší chyby v určitých oblastech modelu zjemněna (zahuštěna). Pomocí HPC je umožněno zrychlení výpočtů současným řešením několika úloh najednou, kdy je zvýšen výpočetní výkon využitím více jader procesoru CPU, grafického procesoru GPU a je vyhrazena větší část paměti RAM. Další možností zrychlení výpočtu je propojení s výkonnějším počítačem, kdy je jím výpočet proveden částečně nebo úplně anebo výpočet provést v ANSYS cloudu.

Výše uvedené možnosti a schopnosti tohoto programu jsou uvedeny přehledově a zdaleka ne úplně, protože jsou velice rozsáhlé a ani není cílem je zde všechny uvádět. Spíše je tím naznačeno, jak mocným a účinným nástrojem tento program je při zkoumání a vývoji nových elektrických strojů, přístrojů a zařízení.

4 Návrh prototypů 3 fázových tlumivek

4.1 Požadované provozní a mechanické parametry

Navrhované prototypy třífázových tlumivek budou součástí řídicí jednotky s frekvenčním měničem pro výtahový pohon. Zadavatelem jsou dány parametry, které budou následně uvedeny. Na vinutí cívky prostřední fáze umístěné na prostředním sloupcu magnetického obvodu z EI plechů musí být umístěno teplotní čidlo, které při překročení teploty vinutí 125 °C vyšle informaci řídicí jednotce. Řídicí jednotka poté zajistí omezení procházejícího elektrického proudu nebo úplné odpojení tlumivky od zdroje elektrické energie. Pro připojení začátků a konců vinutí fázových cívek a teplotního čidla je nutné umístit připojovací svorkovnici nebo konektor s osmi svorkami (vývody). Tlumivky musí být schopny bezproblémového provozu bez nuceného chlazení, tzn. pouze s přirozeným chlazením s výměnou tepla pomocí proudění, sálání a také vedení. Ocelové plechy tvaru E a I, z nichž je složen magnetický obvod, musí být dostatečně staženy tak, aby nedocházelo především vlivem magnetostricke¹ k jejich chvění (rezonancím) při průchodu střídavého harmonického proudu vinutím cívek. Maximální hladina akustického tlaku L_{PA} vážená váhovou funkcí A, která je korigována podle frekvenční citlivosti lidského ucha, nesmí přesáhnout hodnotu 55 dBA. Konstrukce pro uchycení tlumivek do skříně řídicí jednotky musí být taková, aby se případné chvění (rezonance) nepřenašely dále na skříň a ostatní prvky řídicí jednotky. Teplota okolního prostředí, ve kterém budou tlumivky provozovány, se pohybuje v rozmezí od -10 °C do +60 °C s relativní nekondenzující vlhkostí rovné 95 % a nadmořskou výškou 0 m až 1200 m. Izolace vinutí cívek musí splňovat požadavky izolační třídy F, což znamená maximální teplotu vinutí 155 °C s tím, že trvalá maximální provozní teplota by se měla pohybovat o 10 °C níže a maximální teplota okolí nepřesahuje 40 °C. Maximální šířka tlumivek je 119 mm, výška 62 mm a hloubka 63 mm. Rozměry uchycovací patky mohou o několik milimetrů přesahovat maximální rozměry tlumivky a její tloušťka musí být nejméně 2 mm. Uchycovací patka by měla mít svorku pro připojení ochranného vodiče PE nebo pro toto připojení může být využit jeden ze šroubů uchycující patku tlumivky ke skříni. Také by měla mít nejméně 4 uchycovací otvory pro šrouby velikosti M4 s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem tzv. imbusovou hlavou. Rozsah skladovací teploty tlumivek bude od -40 °C do +65 °C a skladovací nadmořská výška 0 m až 2000 m.

¹ Změna rozměrů ocelových plechů vlivem změny působícího magnetického pole

4.2 Požadované elektrické parametry

Oba prototypy tlumivek budou pracovat se jmenovitým napájecím fázovým napětím 480 V o jmenovité frekvenci 50 Hz. Jedna tlumivka má mít indukčnost jedné fáze 2 mH s maximální tolerancí $\pm 0,2$ mH a mezifázovou tolerancí $\pm 0,1$ mH. Trvalý nominální proud I_{NOM} touto tlumivkou má být 6 A, krátkodobý proud I_{ON} 10 A po dobu 60 s při střídě 40 % a špičkový proud I_{PEAK} 17 A po dobu 0,5 s. Průběh indukčnosti v závislosti na proudu by měl být přibližně lineární v mezích daných maximální tolerancí a při hodnotě špičkového proudu musí být indukčnost vyšší nebo rovna 1,7 mH. Druhá tlumivka má mít indukčnost jedné fáze 4 mH s maximální tolerancí $\pm 0,4$ mH a mezifázovou tolerancí $\pm 0,2$ mH. Trvalý nominální proud I_{NOM} touto tlumivkou má být 4 A, krátkodobý proud I_{ON} 7 A po dobu 60 s při střídě 40 % a špičkový proud I_{PEAK} 12 A po dobu 0,5 s. Průběh indukčnosti v závislosti na proudu by měl být také přibližně lineární v mezích daných maximální tolerancí a při hodnotě špičkového proudu musí být indukčnost vyšší nebo rovna 3,2 mH.

4.3 Analytický návrh

Pro splnění požadavku konstantní indukčnosti jednotlivých fází tlumivek v určitém pásmu tolerance a její mezifázovou nevyváženost pro daný rozsah proudového zatížení je několik možností. S ohledem na jednoduchost a výrobní náklady při sériové výrobě se však počet možností splňující tento požadavek značně snižuje. Jak je vidět z Obr. 7 vlevo, délky středních indukčních čar l_{S1} a l_{S3} jsou shodné, ale délka střední indukční čára l_{S2} je kratší. To znamená, jak plyne z rovnice (22), že magnetický odpor (reluktance) krajních větví magnetického obvodu je vyšší, než magnetický odpor střední větve. Tím je zapříčiněno, že magnetický indukční tok vybuzený krajními cívkami, se uzavírá pouze střední větví magnetického obvodu. Tento magnetický indukční tok se tedy uzavírá pouze krajní větví, kde je umístěna cívka, která ho vybudila a střední větví magnetického obvodu, ale protějšší krajní větví magnetického obvodu se neuzavírá. Magnetický indukční tok vybuzený střední cívkou se uzavírá skrze obě krajní i střední větve magnetického obvodu. Z toho vyplývá, že většina magnetického indukčního toku se uzavírá střední větví, nežli krajními větvemi magnetického obvodu. To v případě shodného počtu závitů cívek v jednotlivých fázích způsobí přibližně shodnou indukčnost krajních cívek a vyšší indukčnost střední cívky (viz rovnice (23)).

Možností pro změnu indukčnosti a dosažení tak s určitou tolerancí shodné indukčnosti v jednotlivých fázích máme několik. Plynou ze vzorce (22) pro výpočet magnetického odporu. První možností je shodná délka střední indukční čáry všech větví magnetického obvodu. To je při tomto tvaru magnetického obvodu možné pouze teoreticky, ale prakticky nikoliv. Délka střední indukční čáry krajní větve bude vždy delší, než délka té ve střední větvi magnetického obvodu. Druhá z možností je různý průřez jednotlivých větví magnetického obvodu, což je prakticky realizovatelné, ale s ohledem na jednoduchost a náklady při sériové výrobě nevhodné, protože by to znamenalo různé velikosti koster cívek. Třetí možností je rozdílná relativní permeabilita, tedy části magnetického obvodu složené z různých feromagnetických materiálů. To však také zesložituje výrobu a navyšuje výrobní náklady. Čtvrtá možnost plyne ze vzorce (24) pro výpočet indukčnosti, kde lze požadavku dosáhnout změnou počtu závitů jednotlivých cívek, což ale také není pro sériovou výrobu vhodné řešení. Pátá poslední možnost, která bude z hlediska sériové výroby nejvhodnější, tkví v tom, že se za pomoci malé vzduchové mezery ve všech větvích magnetického obvodu linearizuje průběh indukčnosti pro daný rozsah proudového zatížení. Ale především se pomocí trochu větší vzduchové mezery u střední větve magnetického obvodu dosáhne shodného magnetického odporu všech větví a tedy shodné indukčnosti jednotlivých fází. Díky tomu mohou mít všechny cívky shodný počet závitů, shodný průřez všech částí magnetického obvodu, a tedy i velikost koster cívek a feromagnetický materiál.

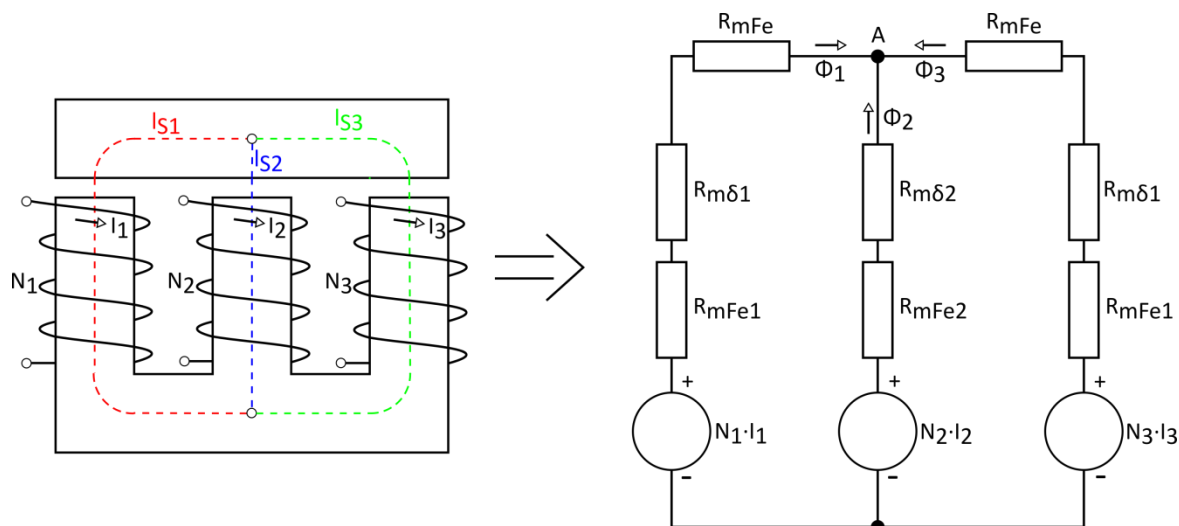
$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} \quad (22)$$

$$L = N \cdot \frac{\Phi}{I} \quad (23)$$

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (24)$$

Analýza magnetického obvodu probíhala nejprve jeho převedením na analogický elektrický obvod (viz Obr. 7 vpravo), což lze při určitých předpokladech provést pro zjednodušení výpočtů, které jsou přibližné a budou následně zpřesněny metodou konečných prvků v programu ANSYS Maxwell. Zmíněnými předpoklady jsou stejné hodnoty magnetické indukce a magnetické intenzity ve všech bodech průřezu větve magnetického obvodu. Dále, že veškerý magnetický indukční tok vybuzený cívkami se uzavírá magnetickým obvodem. Neuvažujeme tedy to, že ve skutečnosti část magnetického

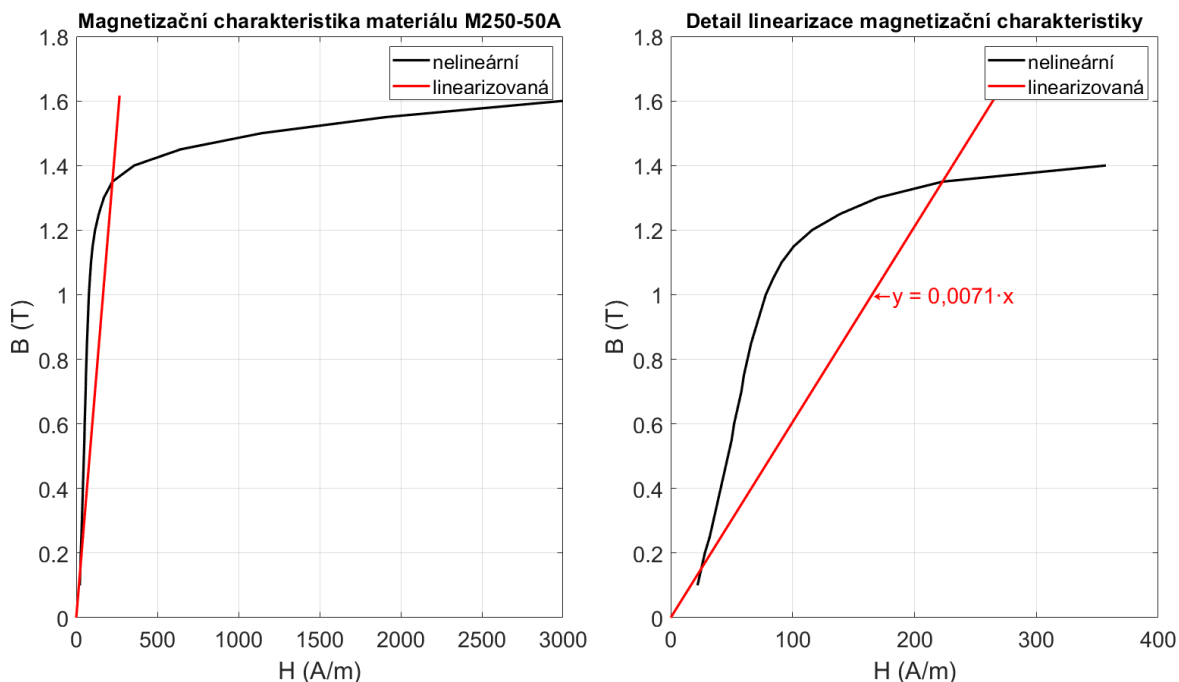
indukčního toku nazývaného rozptylový se uzavírá paralelními cestami, které jsou tvořeny okolním prostředím (např. vzduchem). Při zařazené vzduchové mezeře ve větvi magnetického obvodu uvažujeme, že plocha, kterou se magnetický indukční tok ve vzduchové mezeře uzavírá, je shodná s průřezem větve magnetického obvodu, i když je ve skutečnosti vlivem rozptylového magnetického indukčního toku tato plocha větší (tzn. zanedbáváme opět rozptyl).



Obr. 7 Magnetický obvod (vlevo) a jeho analogický elektrický obvod (vpravo)

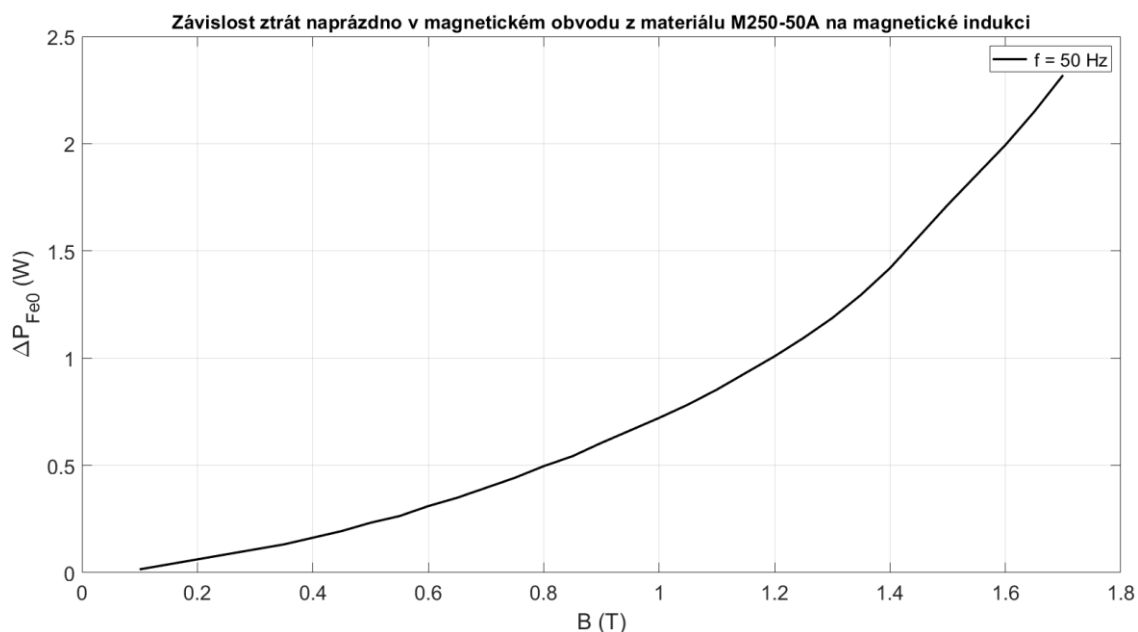
Výběr materiálu ocelových plechů, z kterých je složen magnetický obvod probíhal s důrazem na co nejnižší ztráty v železe (tzn. úzká hysterezní smyčka), vysokou relativní permeabilitu a maximální magnetickou indukci, při níž dochází k nasycení ocelových plechů (feromagnetického materiálu). Ocelové plechy s úzkou hysterezní smyčkou se také nazývají magneticky měkké. Z katalogu výrobce Waasner byl shodně pro obě tlumivky vybrán jako nejvhodnější a bez problému dostupný materiál ocelových plechů s normativním označením M250-50A dle normy ČSN EN 10106.

Jelikož průběh magnetizační charakteristiky (hysterezní křivky) feromagnetického materiálu magnetického obvodu je nelineární, bylo nutné pro další zjednodušení přistoupit k její linearizaci. Ta byla uskutečněna proložením přímkou procházející počátkem souřadného systému a bodem na magnetizační charakteristice, jenž se nachází v oblasti jejího kolene. Z katalogového listu zvoleného materiálu ocelových plechů magnetického obvodu byly načteny výrobcem naměřené hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole pro rekonstrukci magnetizační křivky v programu MATLAB. Příkazem „polyfit“ byla zjištěna směrnice přímky, která odpovídá permeabilitě. Relativní permeabilita byla získána vydělením permeabilitou vakua.



Obr. 8 Linearizace magnetizační charakteristiky materiálu M250-50A

V katalogu pro materiál ocelových plechů M250-50A tvořící magnetický obvod je uvedeno několik závislostí měrných činných výkonových ztrát na magnetické indukci pro různé frekvence. Jelikož jsou měrné ztráty vztaženy na jednotku kilogramu, bylo nutné pro výpočet činného ztrátového výkonu naprázdno celého magnetického obvodu vypočítat jeho celkový objem a pomocí hustoty materiálu jeho hmotnost. Pro hmotnost vypočtenou v Tab. 1, resp. Tab. 2 je závislost činného ztrátového výkonu naprázdno magnetického obvodu na magnetické indukci znázorněna na Obr. 9.



Obr. 9 Závislost činného ztrátového výkonu naprázdno magnetického obvodu z materiálu M250-50A na magnetické indukci pro frekvenci 50 Hz

4.3.1 Tlumivka 2 mH

Zde v Tab. 1 je již analytický návrh se všemi důležitými parametry, kde nejpodstatnější je výpočet velikosti vzduchové mezery střední větve magnetického obvodu na základě rovnosti magnetického odporu krajní a střední větve. Dále počet závitů cívek jednotlivých fází na základě maximální magnetické indukce, činné výkonové ztráty ve vinutí cívek a oteplení.

Střední vzduchová mezera δ_2 je větší zhruba o 16 μm , než krajní vzduchová mezera δ_1 , což je mnohem méně, než je výrobní rozměrová tolerance plechů. Vybraný rozměr plechů s označením 3 UI 60 / EI 100/100 od výrobce Waasner není normovaný a v katalogu ani na internetových stránkách nebyla nalezena výrobní tolerance rozměrů. Proto byla určena výrobní rozměrová tolerance 0,175 mm, která odpovídá podle normy ČSN EN 60740-1 nejbližším normovaným rozměrům ocelových plechů EI s označením EI 102. Z toho plyne, že tato možnost dosažení shodných indukčností cívek jednotlivých fází není z praktického hlediska proveditelná. To bude ještě následně ověřeno metodou konečných prvků v programu ANSYS Maxwell (viz kapitola 4.4.1). Mimoto bude také ověřeno, zdali při vypočteném celkovém počtu závitů jedné cívky N_Z je dosaženo požadované indukčnosti 2 mH.

Tab. 1 Analytický návrh tlumivky 2 mH

frekvence	f (Hz)	-	50
indukčnost tlumivky	L (H)	-	0,002
minimální indukčnost tlumivky	L_{MIN} (H)	-	0,0018
maximální indukčnost tlumivky	L_{MAX} (H)	-	0,0022
napětí 1 fáze	U (V)	-	480
proud 1 fáze nominální	I_{NOM} (A)	-	6
proud 1 fáze krátkodobý 60 s při střídě 40 %	I_{ON} (A)	-	10
proud 1 fáze špičkový 0,5 s	I_{PEAK} (A)	-	17
rozměr a	a (m)	-	0,1
rozměr b	b (m)	-	0,04
rozměr c	c (m)	-	0,02
vzduchová mezera mezi kostrou a jádrem	n_1 (m)	-	0,0005
hloubka kostry	h_1 (m)	-	0,023
šířka kostry	s_1 (m)	-	0,023

výška kostry	v_1 (m)	-	0,018
průměr vodiče	d_D (m)	-	0,00125
průměr vodiče včetně izolace	d_{DIZ} (m)	-	0,001316
průřez jádra	S (m ²)	$S = c \cdot c$	0,0004
průřez vodiče	S_D (m ²)	$S_D = \pi \cdot \frac{d_D^2}{4}$	0,000001227185
teplosměnná plocha vinutí 1 cívky	S_V (m ²)	$S_V = 4 \cdot N_{Z1} \cdot d_{DIZ} \cdot (2 \cdot h_1 + 2 \cdot d_{DIZ} \cdot N_V) + 2 \cdot ((h_1 + 2 \cdot N_V \cdot d_{DIZ})^2 - h_1^2)$	0,005605528
krajní vzduchová mezera	δ_1 (m)	-	0,001
střední vzduchová mezera	δ_2 (m)	$\delta_2 = \delta_1 + \frac{2 \cdot a - c}{2 \cdot \mu_r}$	0,001016017
teplota prostředí	t (°C)	-	20
rozdíl teploty prostředí	Δt (°C)	$\Delta t = t - t_0$	20
teplotní součinitel odporu mědi	α_{Cu} (1/K)	-	0,0039
součinitel přestupu tepla	α (W/(K·m ²))	-	11,55
oteplení vinutí 1 cívky	$\Delta \vartheta_V$ (°C)	$\Delta \vartheta_V = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot S_V}$	63,86
rezistivita mědi při 0 °C	ρ_{Cu0} (Ω·m)	-	0,000000017
rezistivita mědi při 20 °C	ρ_{Cu20} (Ω·m)	$\rho_{Cu20} = \rho_{Cu0} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta t)$	$1,8326 \cdot 10^{-8}$
činitel plnění železa	k_{Fe} (-)	-	0,9
činitel plnění mědi	k_{Cu} (-)	$k_{Cu} = \frac{N_Z \cdot S_D}{v_1 \cdot N_V \cdot d_{DIZ}}$	0,63
permeabilita vakua	μ_0 (H/m)	-	$1,25664 \cdot 10^{-6}$
relativní permeabilita	μ_r (-)	-	5619
magnetická indukce v jádře	B_{Fe} (T)	-	1,4
magnetický odpor R_{mFe}	R_{mFe} (1/H)	$R_{mFe} = \frac{\frac{a}{2} - c + \frac{\pi \cdot c}{4}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$	17702,77
magnetický odpor R_{mFe1}	R_{mFe1} (1/H)	$R_{mFe1} = \frac{b - 2 \cdot c + \frac{a}{2} + \frac{\pi \cdot c}{4}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$	24783,87
magnetický odpor R_{mFe2}	R_{mFe2} (1/H)	$R_{mFe2} = \frac{b - \frac{c}{2}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$	10621,66
magnetický odpor $R_{m\delta_1}$	$R_{m\delta_1}$ (1/H)	$R_{m\delta_1} = \frac{\delta_1}{\mu_0 \cdot S}$	1989436,79
magnetický odpor $R_{m\delta_2}$	$R_{m\delta_2}$ (1/H)	$R_{m\delta_2} = \frac{\delta_2}{\mu_0 \cdot S}$	2021301,77

počet závitů celkem	N_Z (-)	$N_Z = \frac{L \cdot I_{PEAK}}{B_{Fe} \cdot S}$	61
počet závitů v 1 vrstvě	N_{Z1} (-)	$N_{Z1} = \frac{v_1}{d_{DIZ}}$	13
počet vrstev závitů	N_V (-)	$N_V = \frac{N_Z}{N_{Z1}}$	5
délka všech závitů	l_Z (m)	$l_Z = N_{Z1} \cdot (N_V \cdot (2 \cdot s_1 + 2 \cdot h_1) + 4 \cdot d_{DIZ} \cdot \sum_{i=0}^{N_V} (2 \cdot i + 1))$	7,69
rezistance vinutí 1 cívky	R (Ω)	$R = \frac{\rho_{Cu20} \cdot l_Z}{S_D}$	0,11
reaktance vinutí 1 cívky	X_L (Ω)	$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$	0,63
elektrické napětí 1 cívky	U_{EL} (V)	$U_{EL} = \sqrt{X_L^2 + R^2} \cdot I_{NOM}$	3,83
magnetický indukční tok	Φ (Wb)	$\phi = \frac{U_{EL}}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot N_Z \cdot f}$	0,000163618
magnetické napětí 1 cívky	U_{ML} (A)	$U_{ML} = N_Z \cdot I_{NOM}$	366
magnetické napětí krajního sloupku	U_{MKS} (A)	$U_{MKS} = \phi \cdot (R_{mFe} + R_{mFe1} + R_{m\delta1})$	332,46
magnetické napětí středního sloupku	U_{MSS} (A)	$U_{MSS} = \phi \cdot (R_{mFe2} + R_{m\delta2})$	332,46
činný ztrátový výkon vinutí 1 cívky	ΔP (W)	$\Delta P = R \cdot I_{NOM}^2$	4,13

4.3.2 Tlumivka 4 mH

V Tab. 2 je uveden analytický návrh pro druhou z tlumivek se všemi důležitými parametry, kde nejpodstatnější je výpočet velikosti vzduchové mezery střední větve magnetického obvodu. Dále počet závitů cívek jednotlivých fází na základě maximální magnetické indukce, činné výkonové ztráty ve vinutí cívek a oteplení.

Střední vzduchová mezera δ_2 je shodná, jako u tlumivky 2 mH, z čehož plynou ty samé závěry, které budou ještě ověřeny metodou konečných prvků v programu ANSYS Maxwell (viz kapitola 4.4.2). Celkový počet závitů N_Z jedné cívky bude též ověřen.

Tab. 2 Analytický návrh tlumivky 4 mH

frekvence	f (Hz)	-	50
indukčnost tlumivky	L (H)	-	0,004
minimální tlumivky	L_{MIN} (H)	-	0,0036
maximální indukčnost tlumivky	L_{MAX} (H)	-	0,0044
napětí 1 fáze	U (V)	-	480
proud 1 fáze nominální	I_{NOM} (A)	-	4

proud 1 fáze krátkodobý 60 s při střídě 40 %	I_{ON} (A)	-	7
proud 1 fáze špičkový 0,5 s	I_{PEAK} (A)	-	12
rozměr a	a (m)	-	0,1
rozměr b	b (m)	-	0,04
rozměr c	c (m)	-	0,02
vzduchová mezera mezi kostrou a jádrem	n_1 (m)	-	0,0005
hloubka kostry	h_1 (m)	-	0,023
šířka kostry	s_1 (m)	-	0,023
výška kostry	v_1 (m)	-	0,018
průměr vodiče	d_D (m)	-	0,00112
průměr vodiče včetně izolace	d_{DIZ} (m)	-	0,001184
průřez jádra	S (m ²)	$S = c \cdot c$	0,0004
průřez vodiče	S_D (m ²)	$S_D = \pi \cdot \frac{d_D^2}{4}$	0,0000009852
teplosměnná plocha vinutí 1 cívky	S_V (m ²)	$S_V = 4 \cdot N_{Z1} \cdot d_{DIZ} \cdot (2 \cdot h_1 + 2 \cdot d_{DIZ} \cdot N_V) + 2 \cdot ((h_1 + 2 \cdot N_V \cdot d_{DIZ})^2 - h_1^2)$	0,006519919
krajní vzduchová mezera	δ_1 (m)	-	0,001
střední vzduchová mezera	δ_2 (m)	$\delta_2 = \delta_1 + \frac{2 \cdot a - c}{2 \cdot \mu_r}$	0,001016017
teplota prostředí	t (°C)	-	20
rozdíl teploty prostředí	Δt (°C)	$\Delta t = t - t_0$	20
teplotní součinitel odporu mědi	α_{Cu} (1/K)	-	0,0039
součinitel přestupu tepla	α (W/(K·m ²))	-	11,55
oteplení vinutí 1 cívky	$\Delta \vartheta_V$ (°C)	$\Delta \vartheta_V = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot S_V}$	39,54
rezistivita mědi při 0 °C	ρ_{Cu0} (Ω·m)	-	0,000000017
rezistivita mědi při 20 °C	ρ_{Cu20} (Ω·m)	$\rho_{Cu20} = \rho_{Cu0} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta t)$	$1,8326 \cdot 10^{-8}$
činitel plnění železa	k_{Fe} (-)	-	0,9
činitel plnění mědi	k_{Cu} (-)	$k_{Cu} = \frac{N_Z \cdot S_D}{v_1 \cdot N_V \cdot d_{DIZ}}$	0,66
permeabilita vakua	μ_0 (H/m)	-	$1,25664 \cdot 10^{-6}$
relativní permeabilita	μ_r (-)	-	5619
magnetická indukce v jádře	B_{Fe} (T)	-	1,4
magnetický odpor R_{mFe}	R_{mFe} (1/H)	$R_{mFe} = \frac{\frac{a}{2} - c + \frac{\pi \cdot c}{4}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$	16183,15

magnetický odpor R_{mFe1}	R_{mFe1} (1/H)	$R_{mFe1} = \frac{b - 2 \cdot c + \frac{a}{2} + \frac{\pi \cdot c}{4}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$	23264,25
magnetický odpor R_{mFe2}	R_{mFe2} (1/H)	$R_{mFe2} = \frac{b - \frac{c}{2}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}$	10621,66
magnetický odpor $R_{m\delta1}$	$R_{m\delta1}$ (1/H)	$R_{m\delta1} = \frac{\delta_1}{\mu_0 \cdot S}$	1989436,79
magnetický odpor $R_{m\delta2}$	$R_{m\delta2}$ (1/H)	$R_{m\delta2} = \frac{\delta_2}{\mu_0 \cdot S}$	2021301,77
počet závitů celkem	N_Z (-)	$N_Z = \frac{L \cdot I_{PEAK}}{B_{Fe} \cdot S}$	86
počet závitů v 1 vrstvě	N_{Z1} (-)	$N_{Z1} = \frac{v_1}{d_{DIZ}}$	15
počet vrstev závitů	N_V (-)	$N_V = \frac{N_Z}{N_{Z1}}$	6
délka všech závitů	l_Z (m)	$l_Z = N_{Z1} \cdot (N_V \cdot (2 \cdot s_1 + 2 \cdot h_1) + 4 \cdot d_{DIZ} \cdot \sum_{i=0}^{N_V} (2 \cdot i + 1))$	9,98
rezistance vinutí 1 cívky	R (Ω)	$R = \frac{\rho_{Cu20} \cdot l_Z}{S_D}$	0,19
reaktance vinutí 1 cívky	X_L (Ω)	$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$	1,26
elektrické napětí 1 cívky	U_{EL} (V)	$U_{EL} = \sqrt{X_L^2 + R^2} \cdot I_{NOM}$	5,08
magnetický indukční tok	Φ (Wb)	$\Phi = \frac{U_{EL}}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot N_Z \cdot f}$	0,0001510348
magnetické napětí 1 cívky	U_{ML} (A)	$U_{ML} = N_Z \cdot I_{NOM}$	344
magnetické napětí krajního sloupku	U_{MKS} (A)	$U_{MKS} = \Phi \cdot (R_{mFe} + R_{mFe1} + R_{m\delta1})$	306,43
magnetické napětí středního sloupku	U_{MSS} (A)	$U_{MSS} = \Phi \cdot (R_{mFe2} + R_{m\delta2})$	306,89
činný ztrátový výkon vinutí 1 cívky	ΔP (W)	$\Delta P = R \cdot I_{NOM}^2$	2,98

4.4 Ověření analytického návrhu

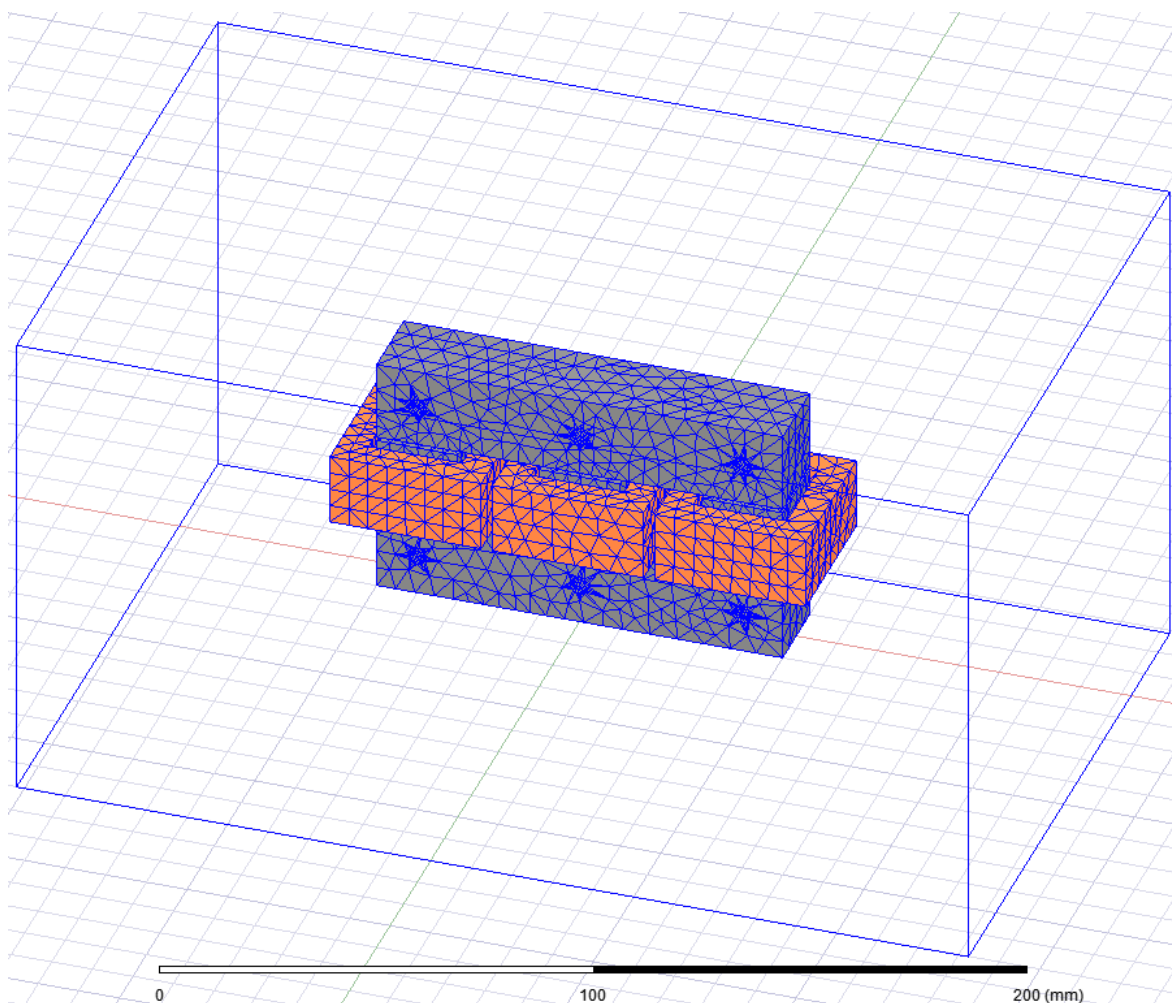
Před konstrukcí prototypů tlumivek bylo nutné ověřit a případně zpřesnit analyticky vypočtené parametry, především dosažení požadované indukčnosti při vypočteném počtu závitů cívek a velikosti vzduchové mezery střední větve magnetického obvodu. Dále také závislost indukčnosti, činných výkonových ztrát ve vinutí cívek a v magnetickém obvodu na protékáním proudem a přesycování magnetického obvodu. Ověření proběhlo metodou

konečných prvků v programu ANSYS Maxwell. Z důvodu časové náročnosti byla upřednostněna podle terminologie programu tzv. „eddy current“ analýza ve frekvenční oblasti, což odpovídá běžně používané analýze v ustáleném stavu nazývané symbolicko-komplexní metoda. Ta je v porovnání s tranzientní analýzou mnohem rychlejší a pro tento účel plně dostačující.

Před spuštěním řešiče bylo nutné definovat materiály jednotlivých částí tlumivky a její okolí, v němž je řešeno elektromagnetické pole. Vinutí cívek je měděné, což je materiál již předdefinovaný v knihovně materiálů. Magnetický obvod je z ocelových plechů, jejichž přesné označení materiálu je M250-50A, pro který bylo nutné dodefinovat jeho charakteristiku magnetizace a měrných činných výkonových ztrát při jmenovité frekvenci 50 Hz, elektrickou vodivost a hustotu. Tlumivka je umístěna v prostředí vakua, jehož ohraničující prostor je ve tvaru kvádra (viz Obr. 10), v němž je řešeno elektromagnetické pole. Rozměry kvádra jsou dvojnásobkem největších rozměrů tlumivek, což je plně dostačující vzhledem k časové náročnosti simulace a účelu. Cívky je nutné napájet, což lze provést přímo pomocí střídavého napětového nebo proudového zdroje, anebo další možností je napájení z externího souboru. Při sledování závislosti indukčnosti na protékáním proudů cívkami eddy current analýzou je použito přímé napájení střídavým proudovým zdrojem, což je nejjednodušší pro parametrizovaný výpočet, kdy je amplituda proudu s krokem 1 A zvyšována od 1 A až do hodnoty I_{PEAK} .

Jelikož je výpočet proveden metodou konečných prvků v trojrozměrném prostoru, je nutné provést diskretizaci částí tlumivky (vinutí, magnetický obvod) a prostředí vakua na konečný počet prvků, které tvoří výpočetní síť. Tyto prvky mají tvar čtyřstěnu (tetraedru), jejichž maximální délka hrany byla pro části tlumivky zvolena 7,5 mm. Pro prostředí vakua je ponechána automatická volba délky hrany a chyba výpočtu nastavena na 5 %. Volba délky hrany čtyřstěnu a procentní chyby souvisí s dobou trvání výpočtu, jeho přesností a konvergencí. Jelikož v částech tlumivky zjišťujeme veličiny, jejichž přesnost je podstatná, je nastavení maximální délky hrany čtyřstěnu nutné pro zajištění relevantnosti získaných výsledků. Automatická volba délky hrany čtyřstěnu pro prostředí vakua je ponechána, protože zde sledujeme pouze rozptylový magnetický indukční tok. Pro prvotně zvolenou délku hrany čtyřstěnu je vygenerována výpočetní síť s tím, že pokud je tvar objektu složitější nebo by nebyl objekt zcela vyplněn čtyřstěny, může se tato délka měnit tak, aby jimi byl ideálně celý objem objektu vyplněn. Řešič provádí výpočet v několika

iteracích, jejichž minimální i maximální počet lze nastavit, zde konkrétně 2 a 10. Počet skutečně provedených iterací je závislý na velikosti procentního rozdílu celkové energie po sobě jdoucích iterací a zároveň procentní energetické chybě každé iterace. První iterace je provedena pro prvotně vytvořenou výpočetní síť a na základě vypočtené energie každého čtyřstěnu je v oblastech jejího největšího gradientu výpočetní síť více zahuštěna pro další iteraci. Tento proces se opakuje, dokud není dosaženo chyby menší než 5 % anebo nastaveného maximálního počtu iterací.

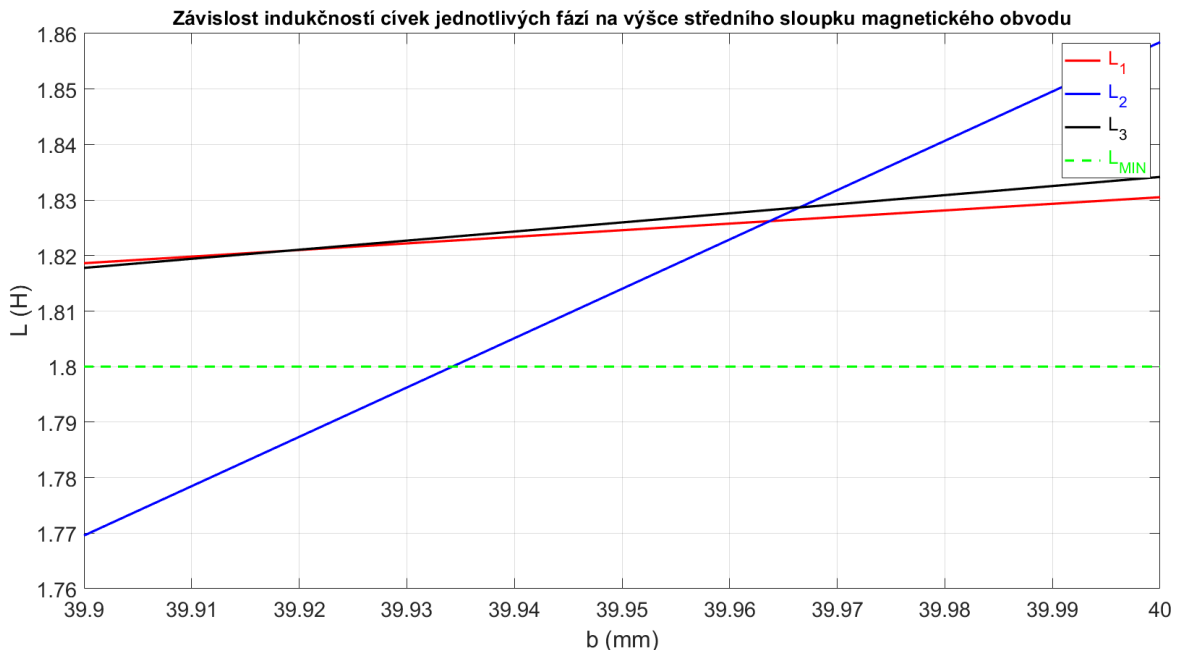


Obr. 10 Model tlumivky se sítí čtyřstěnnů v prostředí programu ANSYS

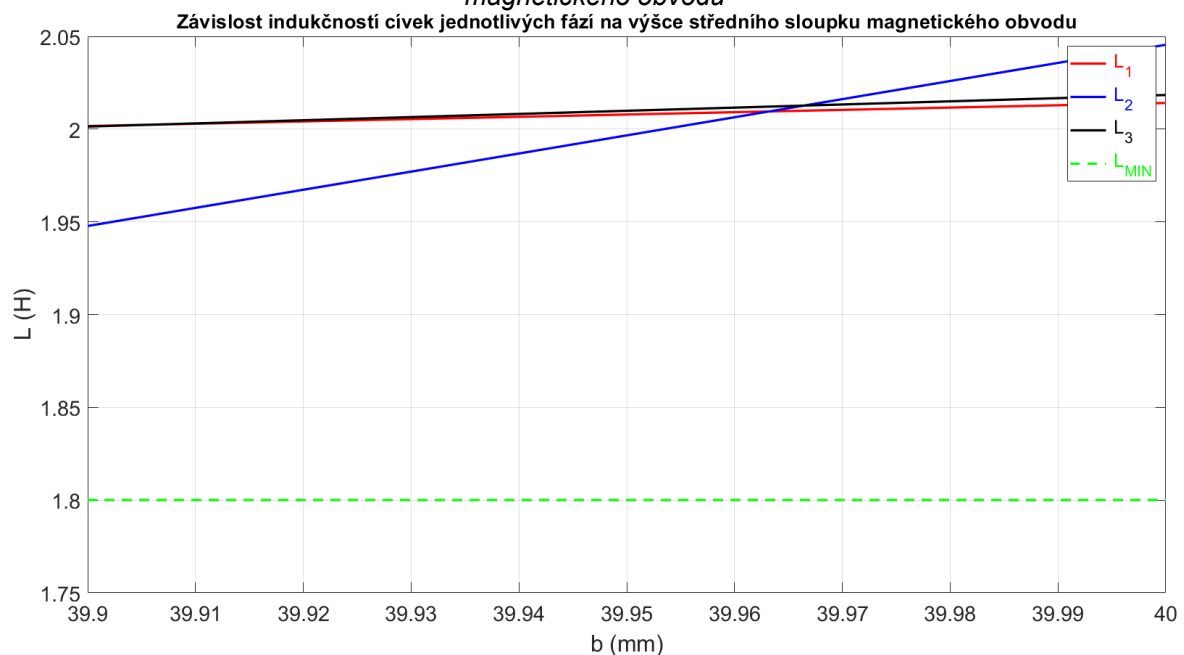
4.4.1 Tlumivka 2 mH

Zprvu byla provedena analýza závislosti indukčnosti na výšce středního sloupku magnetického obvodu, respektive velikosti vzduchové mezery střední větve při analyticky vypočteném počtu 61 závitů cívek jednotlivých fází. Tato analýza byla provedena pro trvalý nominální proud 6 A touto tlumivkou. Z Obr. 11 je zřejmé, že indukčnost se blíží spodní hranici tolerančního pásma, což je nepřijatelné, jelikož by se měla pohybovat v okolí středu tolerančního pásma. Bylo tedy potřeba zvýšit počet závitů všech cívek na 64,

čehož bylo dosaženo postupným zvyšováním a ověřováním velikosti indukčnosti až na požadovanou (viz Obr. 12).



Obr. 11 Závislost indukčností cívek jednotlivých fází s 61 závity na výšce středního sloupku magnetického obvodu

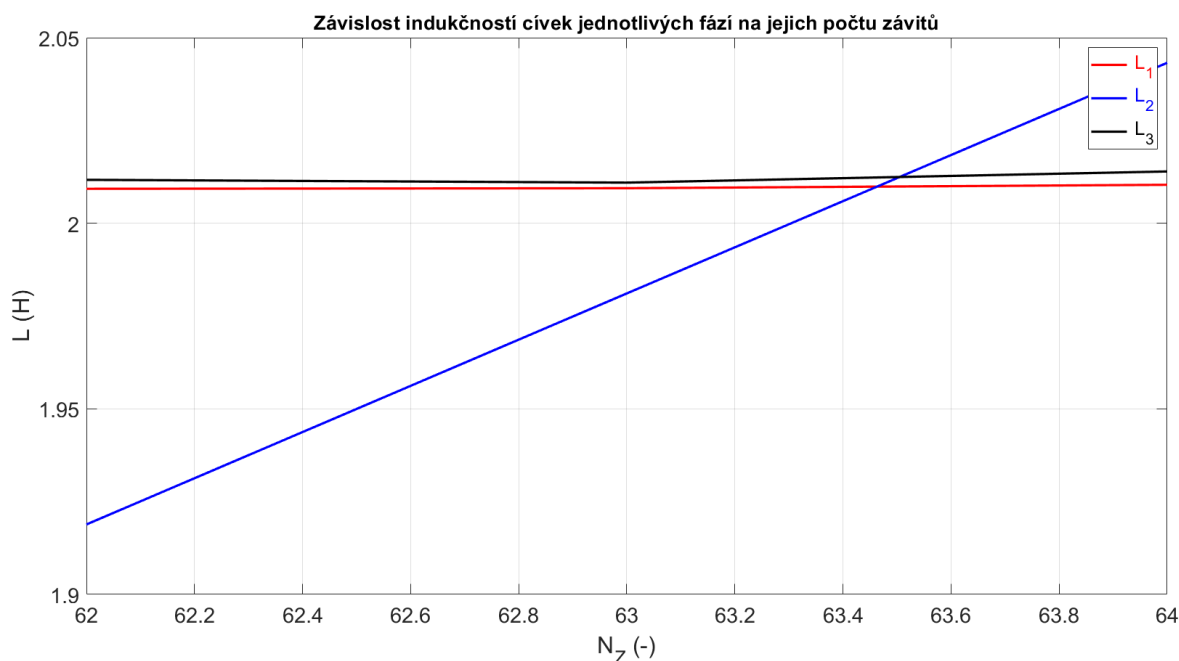


Obr. 12 Závislost indukčností cívek jednotlivých fází s 64 závity na výšce středního sloupku magnetického obvodu

Jak už bylo zmíněno v analytickém návrhu (kapitola 4.3), velikost vzduchové mezery δ_2 je pod výrobní tolerancí ocelových plechů magnetického obvodu. To je nyní potvrzeno i při jeho ověření metodou konečných prvků. Přestože zde vychází velikost vzduchové mezery δ_2 přibližně na 1,04 mm, což je v porovnání s analyticky vypočtenou velikostí 1,016 mm větší, ale stále je výrobní tolerance o jeden řád vyšší. V případě velice přesně

vyrobené a rozměrově stálé raznice by bylo možné tuto metodu pro dosažení shodného magnetického odporu všech větví magnetického obvodu použít.

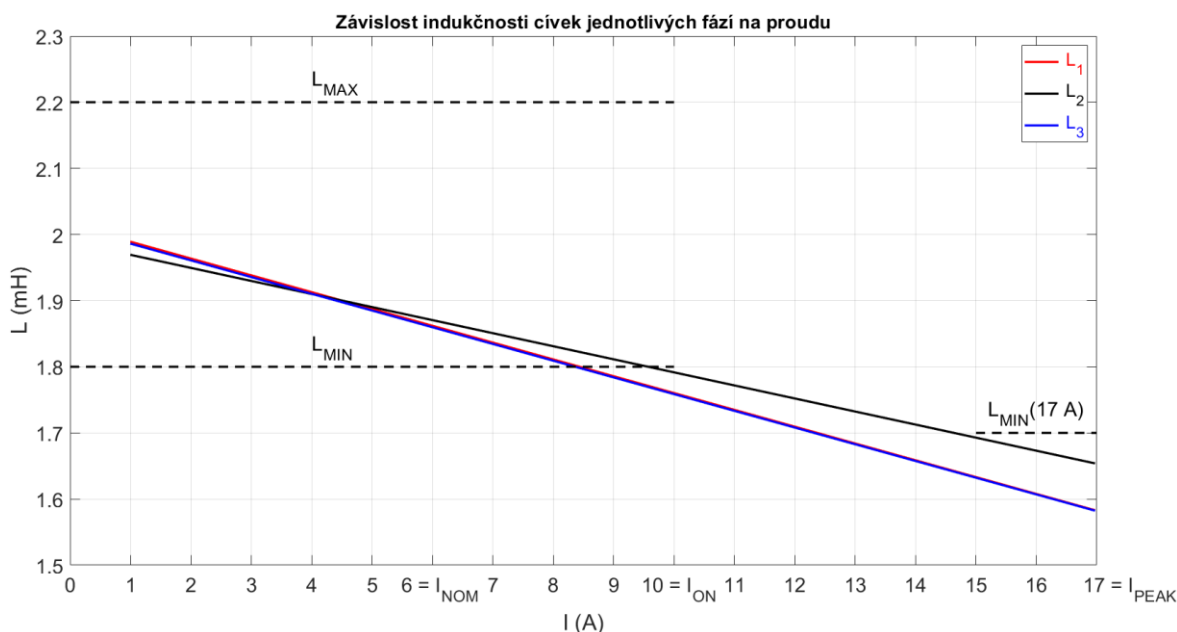
Jelikož se takto přesná raznice nepředpokládá, bylo přistoupeno k další možnosti, a to zachování shodné vzduchové mezery všech větví magnetického obvodu, shodného počtu závitů krajních cívek, ale odlišného počtu závitů cívky střední. Vzduchová mezera je ve všech větvích o velikosti 1 mm a výška všech sloupků magnetického obvodu je 40 mm. Tato analýza proběhla pro nominální proud 6 A. Na Obr. 13 dochází k protnutí křivek indukčností cívek jednotlivých fází při počtu závitů střední cívky rovném přibližně 63,4 závitů, což při zaokrouhlení na nejbližší nižší celé číslo vychází na 63 závitů. Z hlediska sériové výroby je tato možnost jen nepatrně náročnější, kdy výrobní stroj musí navíjet dva druhy cívek s počtem 63 a 64 závitů, což lze vyřešit více stroji vyrábějícími současně nebo jedním, který vyrábí střídavě každý druh cívky. Navíc cívek s 63 závity je potřeba o polovinu méně, než cívek s 64 závity.



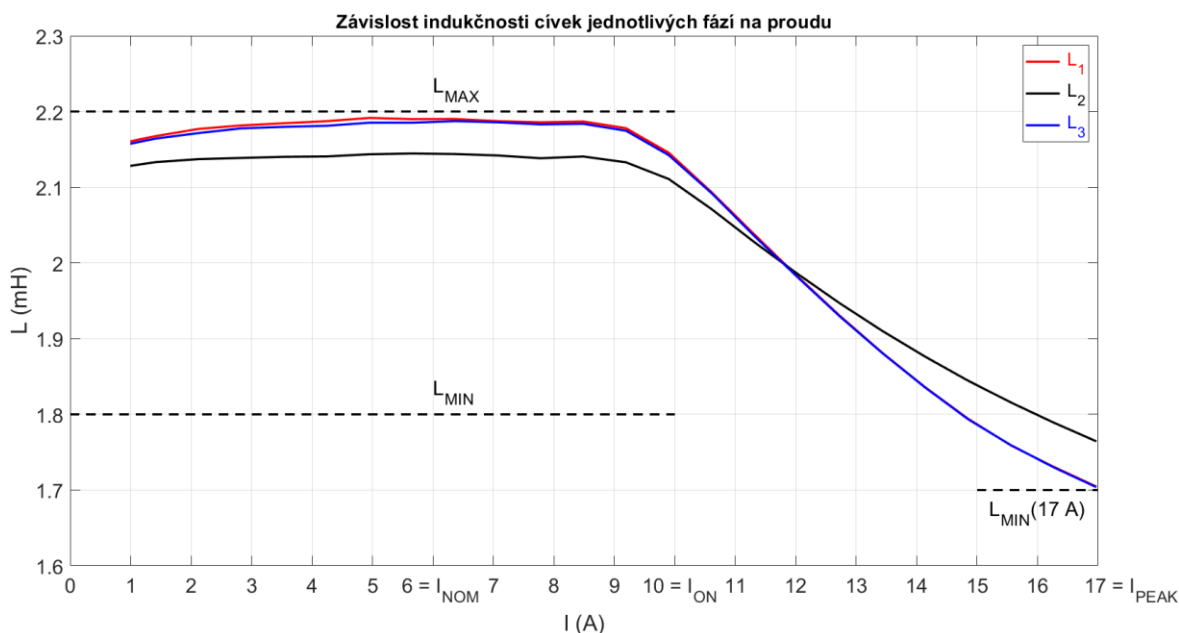
Obr. 13 Závislost indukčností cívek na počtu závitů střední cívky

Dále je nutné ověřit, zdali pro počet 63 a 64 závitů cívek je indukčnost v požadovaných mezích tolerančního pásma v celém rozsahu proudového zatížení tlumivky. To je pro prvotní ověření provedeno pro proud 1 A a špičkový proud 17 A, viz Obr. 14. Je vidět, že pro špičkový proud je indukčnost všech cívek pod spodní hranicí tolerance. Mezifázový rozdíl indukčností cívek nepřevyšuje pro žádný proud požadovanou hodnotu 0,1 mH. Aby byla indukčnost cívek v požadovaném tolerančním pásmu, je nutné

zvýšit počet závitů všech cívek. Několika simulacemi s vyššími počty závitů cívek se jako nejvhodnější kombinace ukazuje 65 závitů střední cívky a 67 závitů krajních cívek. Simulace proběhly shodným způsobem jako u cívek s 63 a 64 závitů, tzn. ověření mezifázového rozdílu indukčnosti a indukčnosti cívek při proudu 1 A a špičkovém proudu 17 A. Následně již může nastat podrobnější ověření toho, zda je pro 65 a 67 závitů cívek jejich indukčnost v celém rozsahu proudového zatížení v požadovaných mezích tolerančního pásma. To je provedeno pro proud od 1 A do špičkového proudu 17 A s krokem 1 A. Jak je vidět na Obr. 15 skutečně je v celém rozsahu proudového zatížení indukčnost všech cívek v požadovaných mezích tolerančního pásma. Nejvyšší mezifázový rozdíl indukčností je 0,0605 mH a nastává při špičkovém proudu 17 A. Průběh indukčnosti odpovídá tvaru magnetizační křivky a sycení feromagnetického materiálu M250-50A, kdy v okolí krátkodobého proudu 10 A dochází k nasycování feromagnetika a tedy poklesu indukčnosti až do blízkosti minimální požadované hodnoty. Rozdíl indukčnosti střední a krajních cívek je dán tím, že počet závitů může být pouze přirozené číslo a permeabilita feromagnetika se s proudem mění.

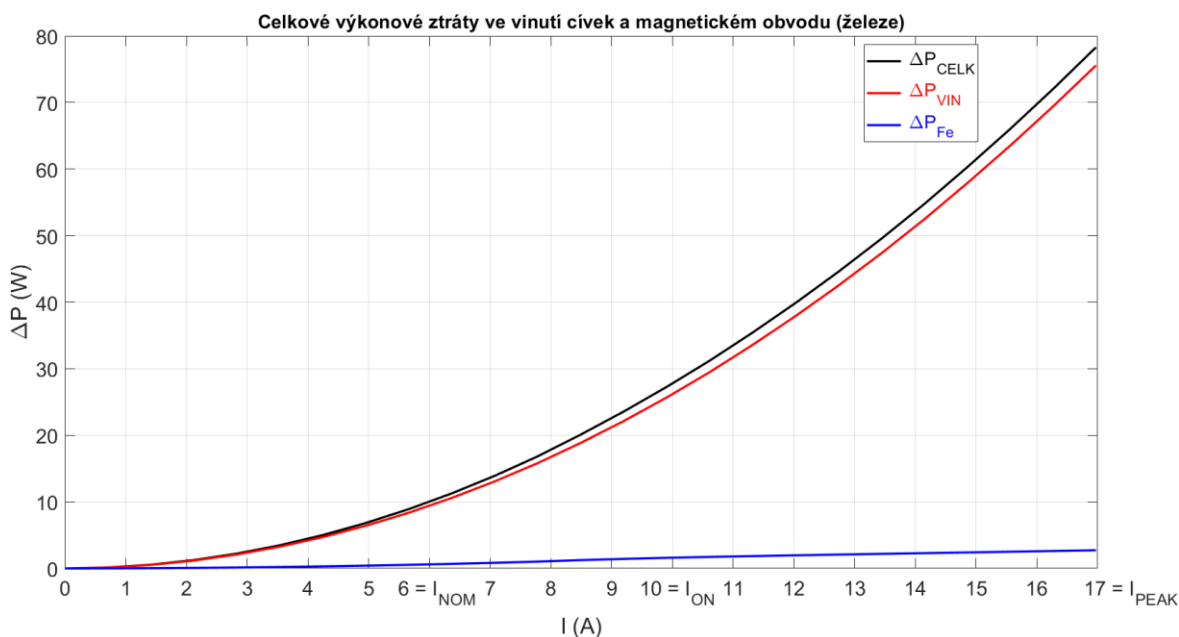


Obr. 14 Závislost indukčnosti cívek na proudu



Obr. 15 Závislost indukčnosti cívek na proudu s upraveným počtem závitů

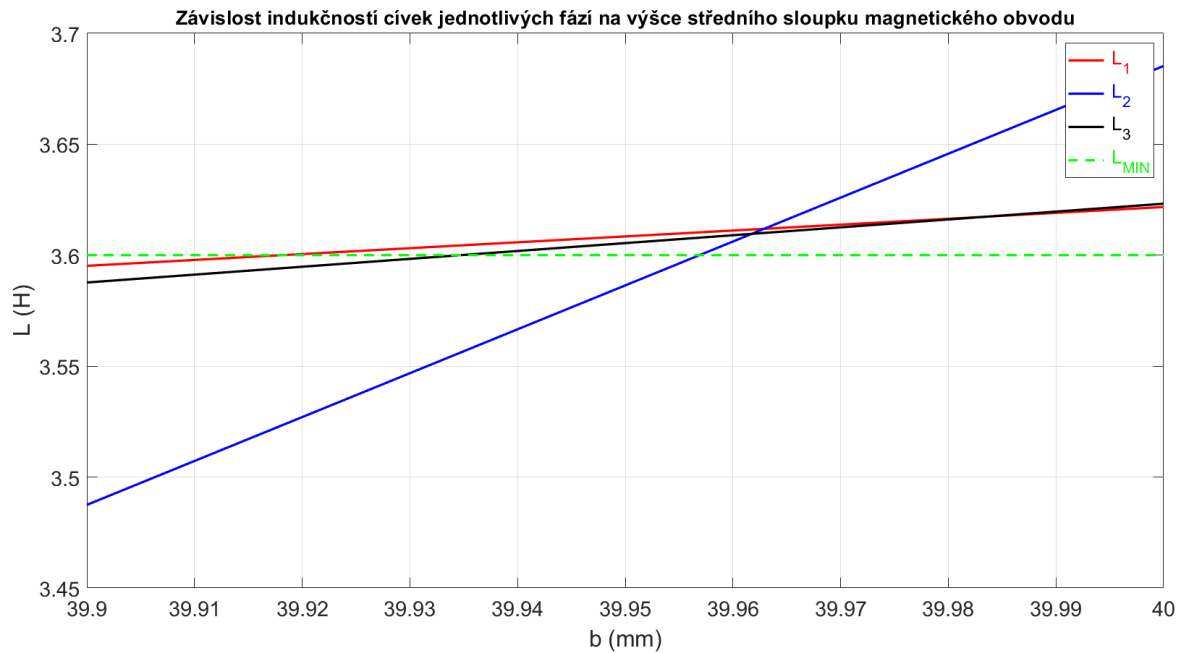
Závislost činných výkonových ztrát je na Obr. 16, kde činné výkonové ztráty v magnetickém obvodu (železe) složené z činných výkonových ztrát hysterenzních a vířivými proudy tvoří téměř zanedbatelnou část z celkových činných výkonových ztrát. Činné výkonové ztráty vířivými proudy jsou značně omezeny použitím listěného magnetického obvodu. Nejzásadnější jsou činné výkonové ztráty vznikající průchodem proudu vinutím cívek, které má nenulový odpor. Vznikající teplo způsobuje především oteplení cívek, ale prostupem tohoto tepla přes kostru až do magnetického obvodu způsobuje oteplení i magnetického obvodu. Samotné činné výkonové ztráty v magnetickém obvodu (železe) a tím vznikající teplo však velké oteplení nezpůsobuje. Činné výkonové ztráty vznikající ve vodičích vinutí cívek je možné omezit zvýšením průřezu vodiče. Nicméně zde jsme omezeni maximálními rozměry, kterých může tlumivka dosahovat a tedy maximální velikost průřezu vodiče je omezena. Zvolený průřez 1,316 mm včetně izolačního laku je takový, aby byl prostor mezi sloupky magnetického obvodu co nejvíce využit, byla zachována určitá prostorová rezerva a do prostoru mezi sloupky se vměstnal potřebný počet závitů včetně impregnace vinutí impregnačním lakem.



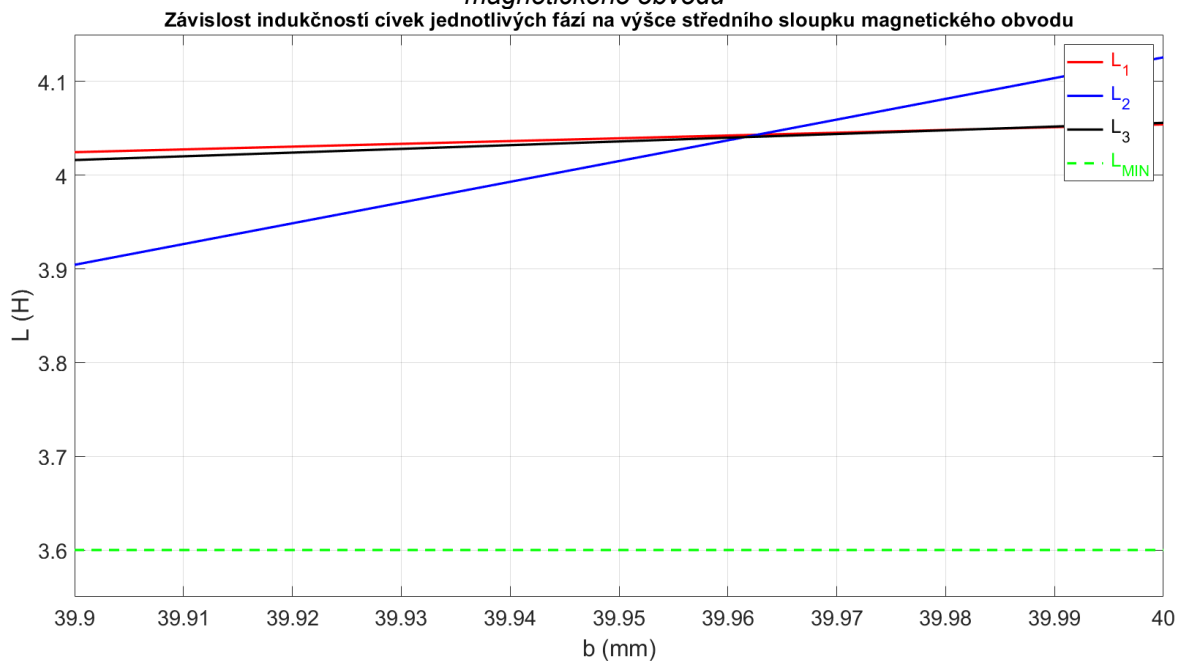
Obr. 16 Závislost celkových činných výkonových ztrát ve vinutí cívek a magnetickém obvodu (železe)

4.4.2 Tlumivka 4 mH

Zprvu byla provedena analýza závislosti indukčnosti na výšce středního sloupku magnetického obvodu, respektive velikosti vzduchové mezery střední větve při analyticky vypočteném počtu 86 závitů cívek jednotlivých fází. Tato analýza byla provedena pro trvalý nominální proud 4 A touto tlumivkou. Z Obr. 17 je zřejmé, že indukčnost se blíží spodní hranici tolerančního pásma ještě více, než u tlumivky 2 mH, což je nepříjemné, jelikož by se měla pohybovat v okolí středu tolerančního pásma. Bylo tedy potřeba zvýšit počet závitů všech cívek na 91, čehož bylo dosaženo postupným zvyšováním a ověřováním velikosti indukčnosti až na požadovanou (viz Obr. 18).



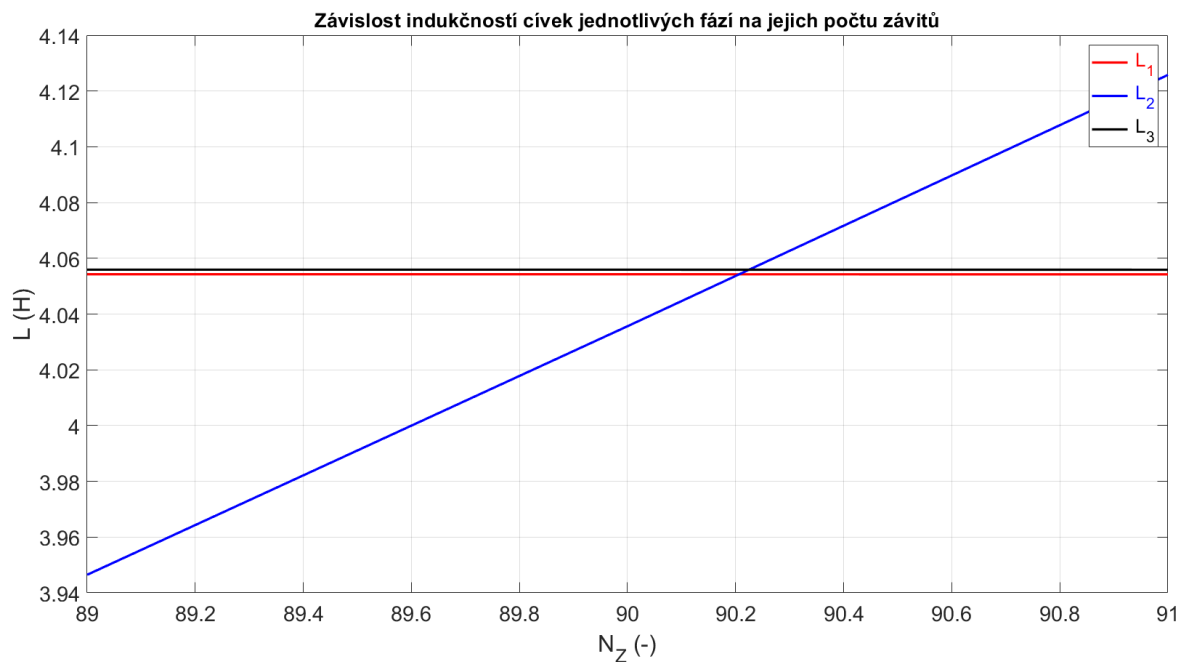
Obr. 17 Závislost indukčností cívek jednotlivých fází s 86 závity na výšce středního sloupku magnetického obvodu



Obr. 18 Závislost indukčností cívek jednotlivých fází s 91 závity na výšce středního sloupku magnetického obvodu

Jak už bylo zmíněno u tlumivky 2 mH, velikost vzduchové mezery δ_2 je pod výrobní tolerancí ocelových plechů magnetického obvodu. To je shodné i u tlumivky 4 mH a bylo tedy opět přistoupeno k další možnosti, a to zachování shodné vzduchové mezery všech větví magnetického obvodu, shodného počtu závitů krajních cívek, ale odlišného počtu závitů cívky střední. Vzduchová mezera je ve všech větvích o velikosti 1 mm a výška všech sloupků magnetického obvodu je 40 mm. Tato analýza proběhla pro nominální proud 4 A. Na Obr. 19 dochází k protnutí křivek indukčností cívek jednotlivých fází při

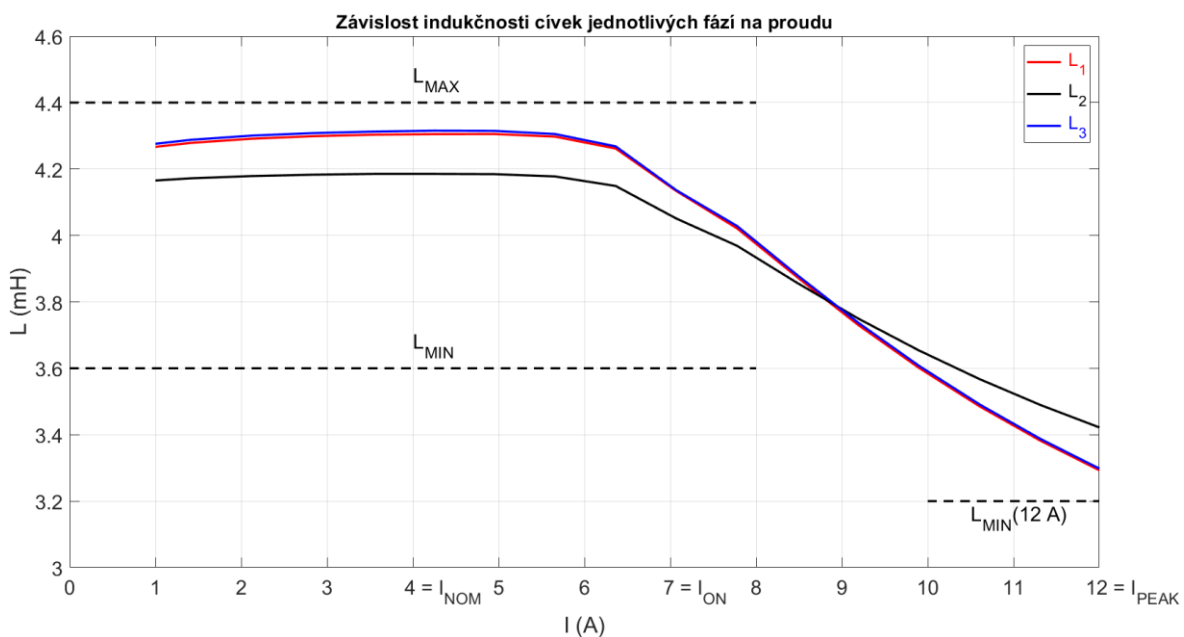
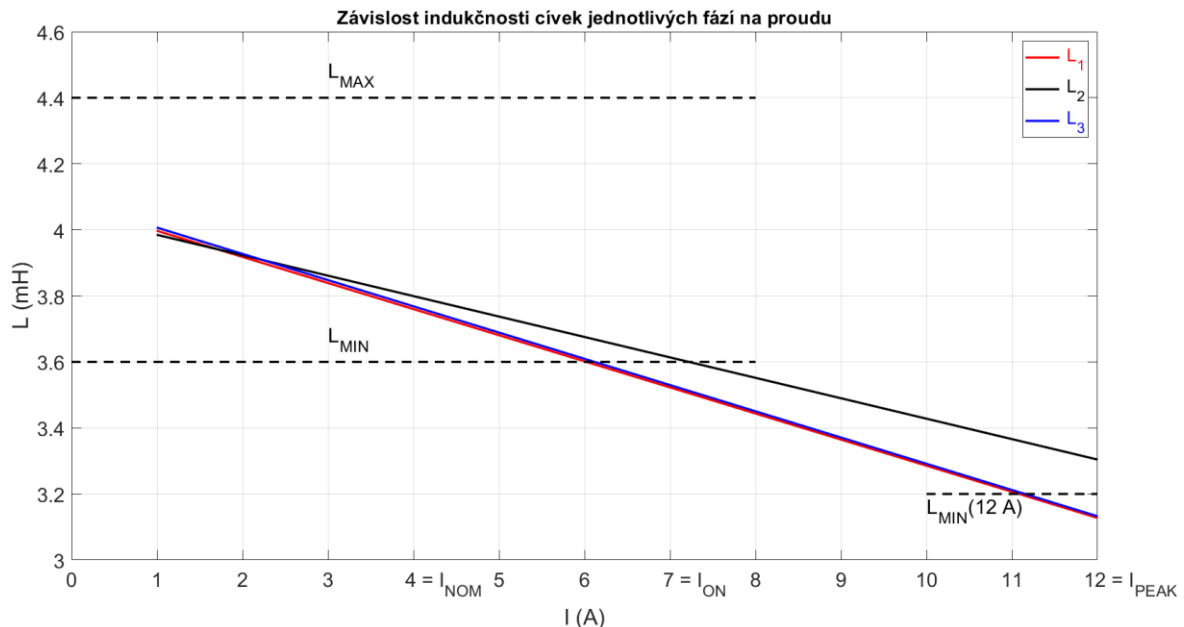
počtu závitů střední cívky rovném přibližně 90,2 závitů, což při zaokrouhlení na nejbližší nižší celé číslo vychází na 90 závitů. Z hlediska sériové výroby je tato možnost jen nepatrně náročnější, jako je tomu v případě tlumivky 2 mH.



Obr. 19 Závislost indukčností cívek na počtu závitů střední cívky

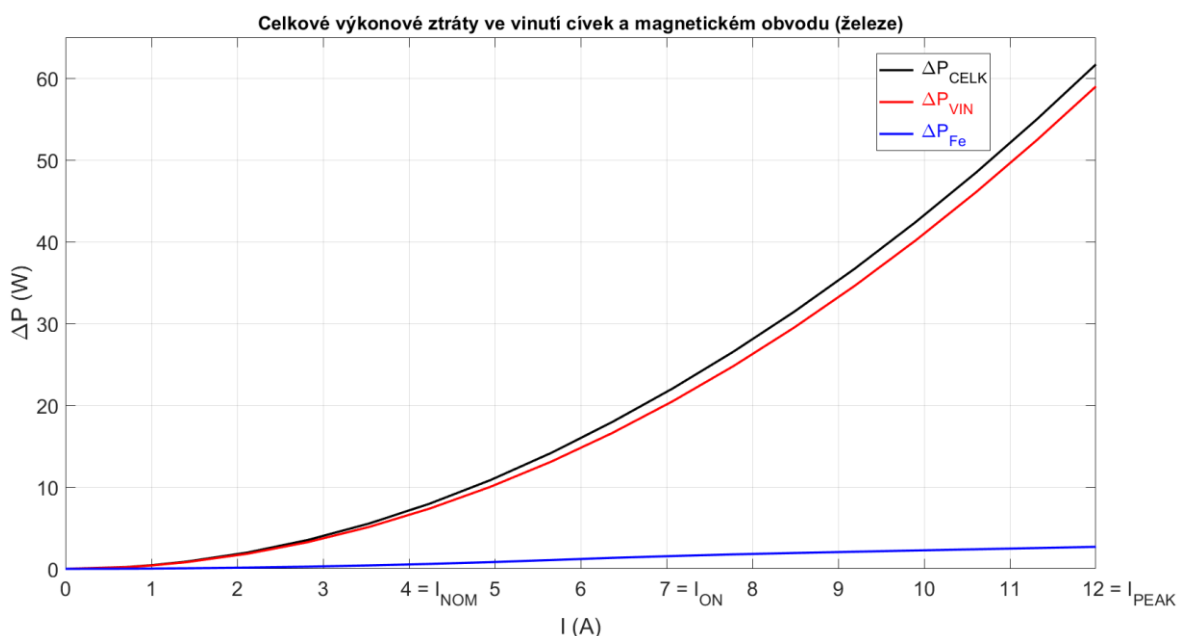
Dále je nutné ověřit, zdali pro počet 90 a 91 závitů cívek je indukčnost v požadovaných mezích tolerančního pásma v celém rozsahu proudového zatížení tlumivky. To je pro prvotní ověření provedeno pro proud 1 A a špičkový proud 12 A, viz Obr. 20. Je vidět, že pro špičkový proud je indukčnost krajních cívek pod spodní hranicí tolerance vyjma indukčnosti střední cívky. Mezifázový rozdíl indukčností cívek nepřevyšuje pro žádný proud požadovanou hodnotu 0,2 mH. Aby byla indukčnost cívek v požadovaném tolerančním pásmu, je nutné zvýšit počet závitů všech cívek. Několika simulacemi s vyššími počty závitů cívek se jako nejvhodnější kombinace ukazuje 92 závitů střední cívky a 94 závitů krajních cívek. Simulace proběhly shodným způsobem jako u cívek s 90 a 91 závitů, tzn. ověření mezifázového rozdílu indukčností a indukčností cívek při proudu 1 A a špičkovém proudu 12 A. Následně již může nastat podrobnější ověření toho, zda je pro 92 a 94 závitů cívek jejich indukčnost v celém rozsahu proudového zatížení v požadovaných mezích tolerančního pásma. To je provedeno pro proud od 1 A do špičkového proudu 12 A s krokem 1 A. Jak je vidět na Obr. 21 skutečně je v celém rozsahu proudového zatížení indukčnost všech cívek v požadovaných mezích tolerančního pásma. Nejvyšší mezifázový rozdíl indukčností je 0,1302 mH a nastává při proudu 5 A. Průběh indukčnosti odpovídá tvaru magnetizační křivky a sycení feromagnetického materiálu

M250-50A, kdy v okolí proudu 6 A dochází k nasycování feromagnetika a tedy poklesu indukčnosti až do blízkosti minimální požadované hodnoty. Rozdíl indukčnosti střední a krajních cívek je dán tím, že počet závitů může být pouze přirozené číslo a permeabilita feromagnetika se s proudem mění.



Závislost činných výkonových ztrát je na Obr. 22, kde činné výkonové ztráty v magnetickém obvodu (železe) složené z činných výkonových ztrát hysterezních a vířivými proudy tvoří téměř zanedbatelnou část z celkových činných výkonových ztrát. Činné výkonové ztráty vířivými proudy jsou značně omezeny použitím listěného

magnetického obvodu. Nejzásadnější jsou činné výkonové ztráty vznikající průchodem proudem vinutím cívek, které má nenulový odpor. Vznikající teplo způsobuje především oteplení cívek, ale prostupem tohoto tepla přes kostru až do magnetického obvodu způsobuje oteplení i magnetického obvodu. Samotné činné výkonové ztráty v magnetickém obvodu (železe) a tím vznikající teplo však velké oteplení nezpůsobuje. Činné výkonové ztráty vznikající ve vodičích vinutí cívek je možné omezit zvýšením průřezu vodiče. Nicméně zde jsme omezeni maximálními rozměry, kterých může tlumivka dosahovat a tedy maximální velikost průřezu vodiče je omezena. Zvolený průřez 1,184 mm včetně izolačního laku je takový, aby byl prostor mezi sloupky magnetického obvodu co nejvíce využit, byla zachována určitá prostorová rezerva a do prostoru mezi sloupky se vměstnal potřebný počet závitů včetně impregnace vinutí impregnačním lakem.



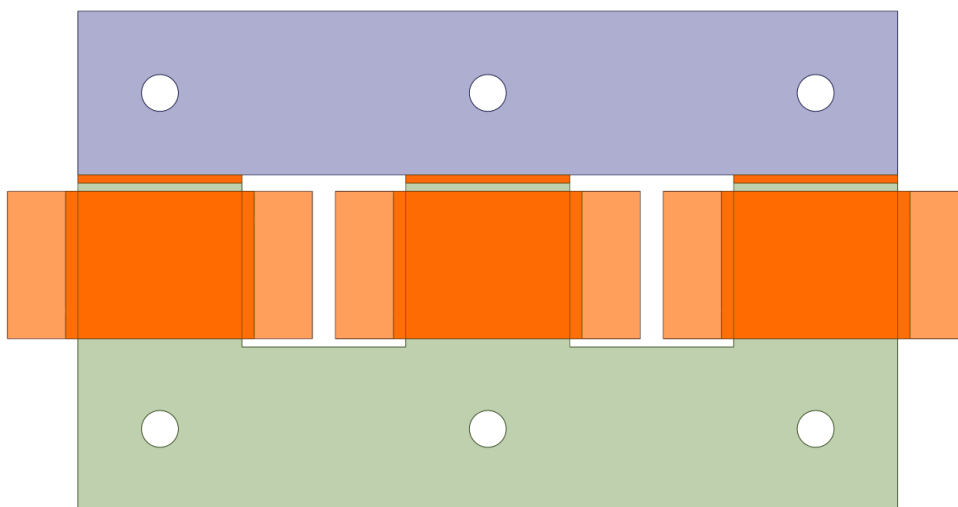
Obr. 22 Závislost celkových činných výkonových ztrát ve vinutí cívek a magnetickém obvodu (železe)

4.5 Teplotní analýza

Teplotní analýza je provedena pro ustálený přenos tepla v jednotlivých prvcích tlumivky podle terminologie programu ANSYS tzv. „Steady State Thermal Analysis“. Ustálený přenos tepla znamená, že se teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi prvků v čase nemění. V programu ANSYS Workbench, který sdružuje různé programy ANSYS bude využit ANSYS Mechanical APDL. ANSYS Mechanical APDL umožňuje teplotní analýzu ustáleného přenosu tepla pomocí metody konečných prvků. Touto teplotní analýzou zjistíme rozložení teploty na jednotlivých prvcích tlumivky v ustáleném stavu a pomocí toho vyhodnotíme, zda není překročeno při jmenovitém proudu tlumivkou maximální

povolené oteplení, respektive teplota těchto prvků. Přenos tepla v provedených analýzách je uvažován pomocí vedení (kondukce) a proudění (konvekce). Přenos tepla zářením (radiací) je zanedbatelný při teplotách pod 125 °C, což je hraniční provozní teplota vinutí cívek. Uvažována je nejneprůzračnější možná situace, kdy je maximální provozní teplota okolního prostředí 60 °C a nadmořská výška je nejvyšší provozní 1200 m. S tím je spojen zhoršený přenos tepla ze všech povrchů tlumivky do okolního prostředí kvůli klesající hustotě vzduchu s rostoucí nadmořskou výškou. Jelikož klesá hustota vzduchu, tak v určitém objemu klesá počet molekul, které mají určitou hmotnost a schopnost přijímat a předávat určité množství energie (tepla). Při tepelné výměně je pak množství tepla přijatého určitým objemem vzduchu nižší, než by bylo při vyšší hustotě vzduchu a teplota povrchů tlumivky je tedy kvůli zhoršenému odvodu tepla vyšší.

Zprvu je nutné do prostředí ANSYS Workbench nahrát 3D model tlumivky vytvořený již při ověření analytického návrhu v programu ANSYS Maxwell. Ten se pro každou z tlumivek liší v rozměrech vinutí cívek. Nahrání je prostřednictvím přidruženého programu ANSYS SpaceClaim, což je 3D modelovací CAD program. V něm je do modelu tlumivek nutné doplnit do prostoru mezi cívkami a sloupky magnetického obvodu a také do prostoru vzduchové mezery vzduchové prostředí (viz Obr. 23 zvýrazněné tmavě oranžové části). Správné vytvoření kontaktů v modelu tlumivky mezi vytvořeným vzduchovým prostředím a jednotlivými částmi je zajištěno pomocí operace „imprint“, která automaticky dané povrchy detekuje a vytvoří mezi nimi kontakty. Poté, již v programu ANSYS Mechanical APDL, je proveden obdobný proces jako při ověřování analytického návrhu v programu ANSYS Maxwell.



Obr. 23 3D Model tlumivky v programu ANSYS SpaceClaim se zvýrazněním vzduchových prostředí (tmavě oranžová)

Jednotlivým částem tlumivky jsou přiřazeny různé souřadné systémy, aby bylo následně možné vhodně přiřadit různé tepelné vodivosti v každé z os. Magnetickému obvodu a vzduchovému prostředí je přiřazen kartézský souřadný systém a cívkám cylindrický souřadný systém, což je naznačeno na Obr. 24. Vinutí cívek má nejlepší tepelnou i elektrickou vodivost ve směru osy Y (běžně značeno jako osa φ) cylindrického souřadného systému, ve zbývajících osách X a Z (běžně značeno jako osa r a Z) je z důvodu izolačního laku vinutí tepelná vodivost nižší. Magnetický obvod má nejlepší tepelnou vodivost v ose Y a Z kartézského souřadného systému, v ose X je pak tepelná vodivost minimální z důvodu lakové či oxidové izolace jednotlivých feromagnetických plechů, z kterých je složen.

S využitím již předdefinovaných materiálů jsou vytvořeny jejich upravené kopie, konkrétně u vzduchu, mědi a materiálu magnetického obvodu M250-50A. U vzduchu je upravena hustota, tepelná vodivost a dynamická viskozita pro teplotu 60 °C a nadmořskou výšku 1200 m. U měděného vinutí cívek je změna tepelné vodivosti z izotropní na ortotropní, což znamená, že tepelná vodivost je nejlepší jen v ose Y a ve zbylých osách X a Z je minimální. U materiálu feromagnetických plechů magnetického obvodu M250-50A je také změněna tepelná vodivost z izotropní na ortotropní, kde v ose Y a Z kartézského souřadného systému je tepelná vodivost nejlepší a v ose X je minimální. Všechny použité hodnoty těchto materiálových vlastností jsou uvedeny níže v Tab. 3.

Tab. 3 Vlastnosti použitých materiálů v teplotní analýze

		Měď	Vzduch	M250-50A
Tepelná vodivost v ose X	λ_X (W/m·K)	1	0,0285	1
Tepelná vodivost v ose Y	λ_Y (W/m·K)	395	0,0285	22
Tepelná vodivost v ose Z	λ_Z (W/m·K)	1	0,0285	22
Hustota	ρ (kg/m ³)	8940	0,916673	7600
Měrná tepelná kapacita	c (J/kg·K)	385	1006,4	434
Počáteční teplota	T (°C)	60	60	60

Dále jsou nastaveny součinitele přestupu tepla pro jednotlivá rozhraní (kontakty) mezi vzduchovým prostředím a jednotlivými částmi tlumivky. Pro automaticky vytvořené kontakty je ponechána hodnota součinitele přestupu tepla přednastavená samotným programem. Pro zbylá rozhraní je součinitel přestupu tepla vypočítán podle empiricky zjištěných rovnic, které pracují s kritérii podobnosti, což jsou bezrozměrná čísla. Velikost součinitele přestupu tepla totiž nelze jednoduše určit, protože je závislá na mnoha fyzikálních veličinách a parametrech, kterými jsou např. rychlost proudění, tepelná

vodivost, hustota, tlak, měrná tepelná kapacita a viskozita kapaliny či plynu, tvar, rozměry, atd. Tyto empirické rovnice jsou odvozeny pro přirozené či nucené proudění (konvekci) a jednoduchá prostorová tělesa a rovinné útvary (svislá či vodorovná stěna, válec, atd.). Zde je pro výpočet činitele přestupu tepla rovinné stěny při nuceném proudění (konvekci) použito Reynoldsovo, Prandtlovo a Nusseltovo číslo. Přestože chlazení, a tedy i proudění (konvekce), má být podle požadavku přirozené pro výpočet je uvažováno nucené proudění s nízkou rychlostí proudění, protože ve skříní řídicí jednotky budou větrací otvory pro odvod vznikajícího tepla, kterými může procházet okolní vzduch nízkou rychlostí. Podle hodnoty Reynoldsova čísla menší než 2300 se jedná u obou rozhraní o laminární proudění, pro které platí výpočet Nusseltova čísla podle rovnice (27). Pomocí Nusseltova čísla je pak vypočten činitel přestupu tepla podle rovnice (28). Přenos tepla pomocí proudění (konvekce) se pak řídí vztahem (29).

$$\text{Re} = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l}{\frac{\eta}{\rho}} \quad (25)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\frac{\eta}{\rho}}{a} \quad (26)$$

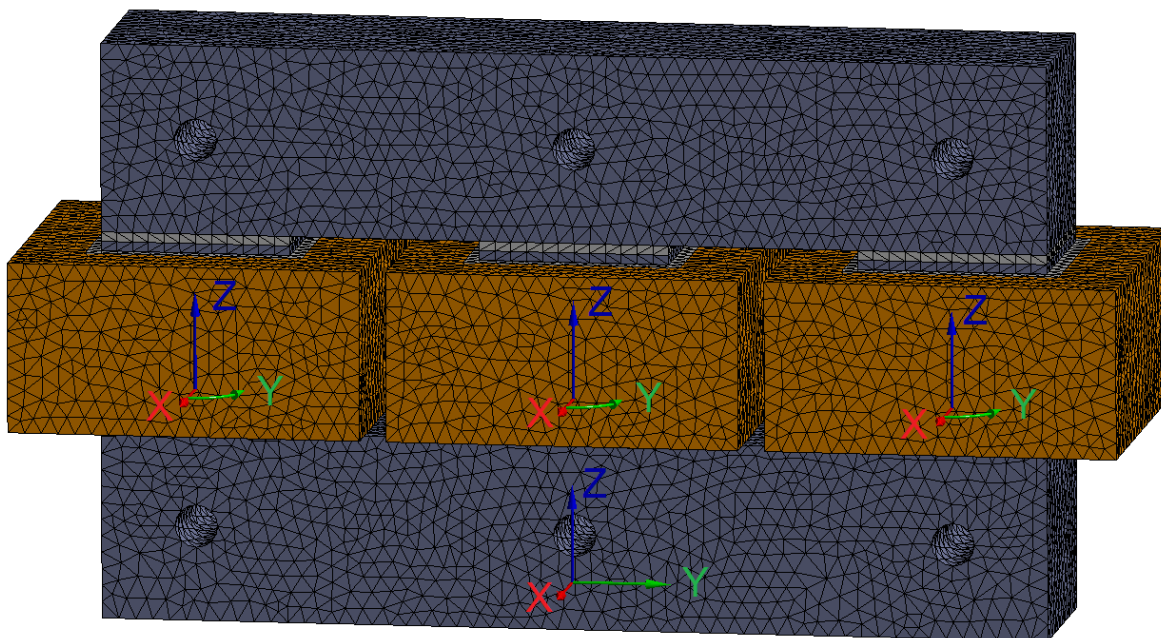
$$\text{Nu} = 0,664 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (27)$$

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{l} \quad (28)$$

$$\Delta P = \Delta \vartheta \cdot \alpha \cdot S \quad (29)$$

Tab. 4 Použité hodnoty pro výpočet součinitele přestupu tepla na rozhraních

		Vinutí cívky- vzduch	M250-50A- vzduch	Vzduch
Reynoldsovo číslo	Re (-)	162,56	903,15	-
Prandtlovo číslo	Pr (-)	0,8413	0,8413	-
Nusseltovo číslo	Nu (-)	7,9966	18,8488	-
Součinitel přestupu tepla	α (W/m ² ·K)	12,66	5,37	-
Charakteristický rozměr	l (mm)	18	100	-
Teplná vodivost	λ (W/m·K)	-	-	0,0285
Teplotní vodivost (difuzivita)	a (m ² /s)	-	-	2,632·10 ⁻⁵
Teplotní objemová roztažnost	β (K ⁻¹)	-	-	3·10 ⁻³
Rychlost proudění	v (m/s)	-	-	0,2
Hustota	ρ (kg/m ³)	-	-	0,916673
Kinematická viskozita	ν (m ² /s)	-	-	2,21445·10 ⁻⁵
Dynamická viskozita	η (Pa·s)	-	-	2,02993·10 ⁻⁵



Obr. 24 Souřadné systémy a výpočetní síť jednotlivých částí tlumivky v programu ANSYS Mechanical APDL

Vinutí cívek a magnetickému obvodu jsou přiřazeny měrné činné výkonové ztráty, které v nich vznikají při jmenovitého proudu vinutím cívek. Vznikající činné výkonové ztráty jsou zjištěny při ověření analytického návrhu v programu ANSYS Maxwell pro každou z tlumivek. Ty jsou poté přepočteny na jednotku objemu, protože do programu ANSYS Mechanical APDL je možné zadávání pouze v jednotkách W/m³.

Tab. 5 Použité činné výkonové ztráty v teplotní analýze

		Činné výkonové ztráty	Objem	Měrné činné výkonové ztráty
		ΔP (W)	V (m ³)	Δp (W/m ³)
Tlumivka 2 mH	Magnetický obvod	0,60	$10,21 \cdot 10^{-5}$	5877,05
	Vinutí 1 cívky	9,40	$1,40 \cdot 10^{-5}$	223585,94
Tlumivka 4 mH	Magnetický obvod	0,53	$10,21 \cdot 10^{-5}$	5207,07
	Vinutí 1 cívky	6,50	$1,54 \cdot 10^{-5}$	140811,51

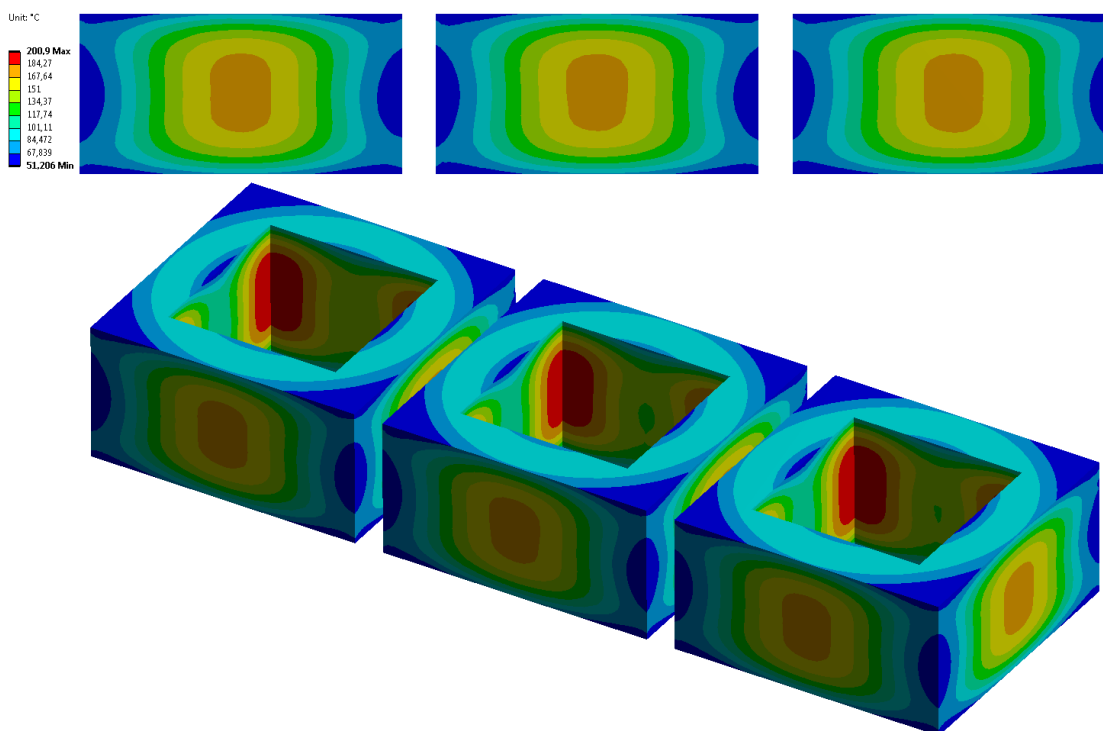
Jelikož je výpočet proveden metodou konečných prvků v trojrozměrném prostoru, je nutné provést diskretizaci částí tlumivky (vinutí cívek, magnetický obvod) a vzduchového prostředí na konečný počet prvků, které tvoří výpočetní síť. Tyto prvky mají tvar čtyřstěnu (tetraedru), jejichž maximální délka hrany je jednotně pro všechny části tlumivky a vzduchové prostředí zvolena 1,8 mm. Tato výpočetní síť je znázorněna na Obr. 24. Nyní je vše již nastaveno a připraveno, a proto je možné spustit řešič.

4.5.1 Tlumivka 2 mH

V analytickém návrhu vychází pro nominální proud 6 A oteplení vinutí jedné cívky 73,1 °C při teplotě okolí 60 °C, tedy nejvyšší teplota 133,1 °C. To se liší přibližně o 7 % se získaným oteplením při teplotní analýze v programu ANSYS Mechanical APDL, kde výsledné průměrné oteplení vinutí v ustáleném stavu dosahuje 83,63 °C a průměrná teplota je 143,63 °C. Je však zřejmé, že je překročena maximální povolená teplota vinutí cívek 125 °C. Při uvažování chyby způsobené zjednodušeními samotného 3D modelu s omezením se pouze na základní části tlumivky, empirickým výpočtem součinitelů přestupu tepla, volbou různých tepelných vodivostí v každé z os souřadného systému a dalších materiálových vlastností lze očekávat, že oteplení vinutí cívek skutečné tlumivky by nemuselo dosahovat až takových hodnot. To lze v tomto případě potvrdit při porovnání se skutečným měřením oteplení na zkonstruovaném prototypu této tlumivky s obdobnými parametry v bakalářské práci Ondřeje Kloudy (viz [3] str. 68). Z měření vychází oteplení na povrchu vinutí střední cívky teplota 103,7 °C, tzn. oteplení 43,7 °C, čímž se potvrzuje vyhovění požadavku nepřekročení teploty vinutí cívek 125 °C. V bakalářské práci je ještě provedena oteplovací zkouška pro krátkodobý proud I_{ON} 10 A po dobu 60 s při střídě 40 %, kdy se v tomto režimu teplota vinutí střední cívky ustálí na hodnotě 134,3 °C, tzn. oteplení 74,3 °C. Pro tento krátkodobý proud teplotní analýza v programu ANSYS Mechanical APDL provedena nebyla, protože to vyžaduje tranzientní teplotní analýzu,

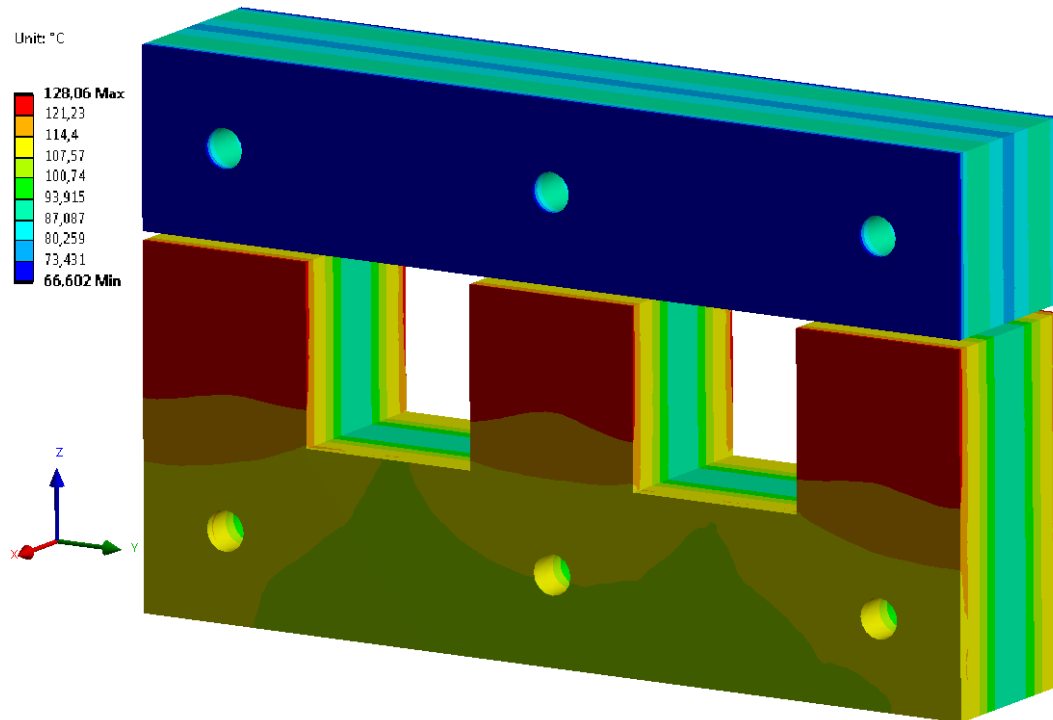
jejíž nároky na výpočetní výkon a operační paměť výpočetní techniky a také čas jsou vysoké.

Nicméně je z výsledků zřejmé, že pro zajištění bezproblémového provozu v celém proudovém rozsahu bez překračování maximální povolené teploty 125 °C je nutné oteplení snížit. Jak plyne z rovnice (29) lze toho dosáhnout zvětšením teplosměnné plochy cívek, snížením činných výkonových ztrát ve vinutí cívek a zvýšením součinitele přestupu tepla. Teplosměnnou plochu cívek však v tomto případě zvětšit nelze, protože jsme omezeni maximálními rozměry tlumivky. Snížení činných výkonových ztrát souvisí také se zvětšováním rozměrů vinutí cívek, protože jejich velikost závisí na rezistanci vinutí cívek, kterou lze snížit zvětšením průřezu vodiče cívek. Průřez vinutí cívek, ale opět z důvodu omezení maximálních rozměrů tlumivky nelze zvětšit. Poslední a jedinou možností, kterou lze využít pro snížení oteplení je zvýšení součinitele přestupu tepla a přejít tak od přirozeného k nucenému proudění. Toho lze dosáhnout s použitím ventilátoru, který zvýší rychlost proudění vzduchu, čímž se při pohledu na rovnice (25), (27) a (28) zvýší hodnota Reynoldsova čísla, následně Nusseltova čísla a nakonec činitele přestupu tepla. S ohledem na požadavek maximální hladiny akustického tlaku 55 dBA a dostatečného zvýšení činitele přestupu tepla je nutný výběr ventilátoru s nižší hladinou akustického tlaku, ale zároveň s dostatečným průtokem vzduchu.



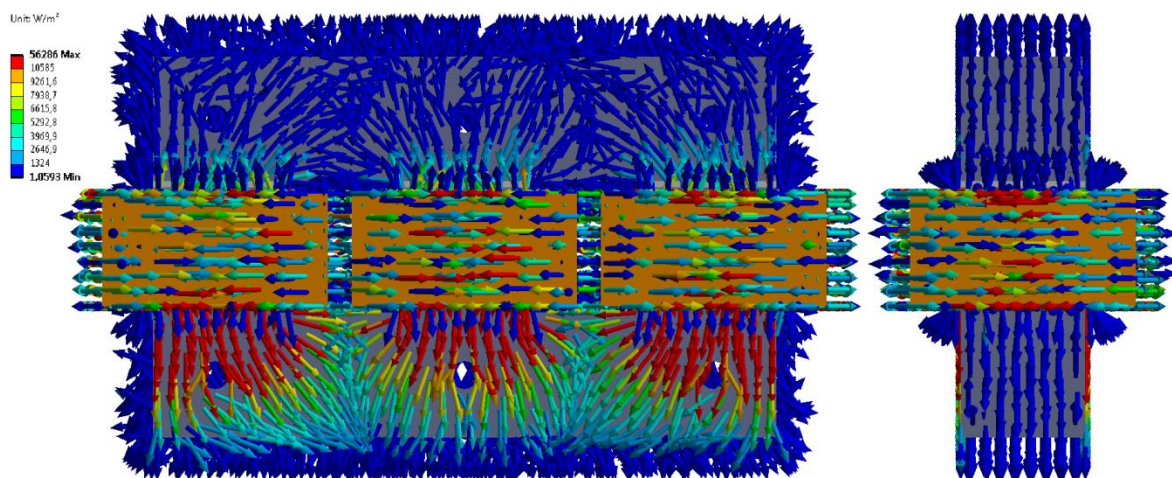
Obr. 25 Rozložení teploty na cívkách tlumivky 2 mH

Průměrná teplota magnetického obvodu pro nominální proud dosahuje $95,67\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tedy průměrné oteplení je $35,67\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naměřené oteplení v bakalářské práci dosahuje $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, tedy maximální teplota je $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zde se výsledné hodnoty liší se skutečným měřením oteplení magnetického obvodu přibližně o 4 %.



Obr. 26 Rozložení teploty na magnetickém obvodu tlumivky 2 mH

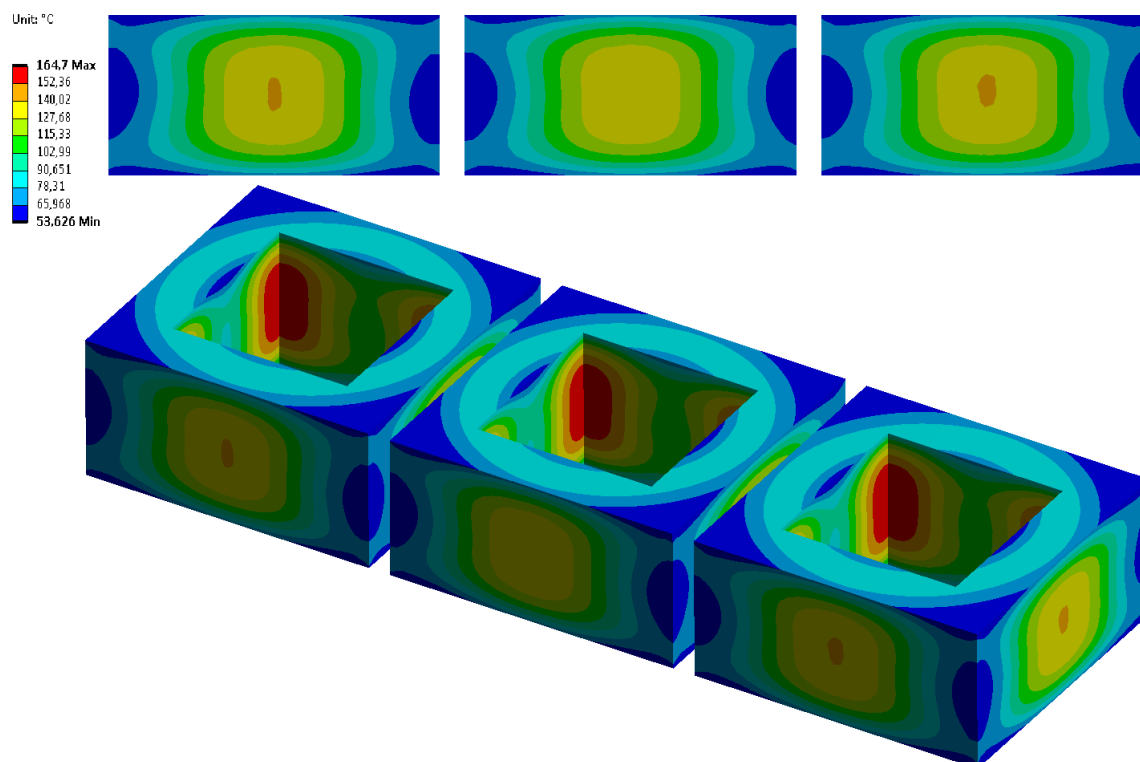
Tepelný tok je vektorově znázorněn na Obr. 27 níže, kde je vidět jakými směry se vznikající teplo šíří. Nejvíce tepla vzniká ve vinutí cívek, které se z nich dále přenáší do magnetického obvodu a okolního vzduchového prostředí.



Obr. 27 Vektorové znázornění tepelného toku tlumivky 2 mH

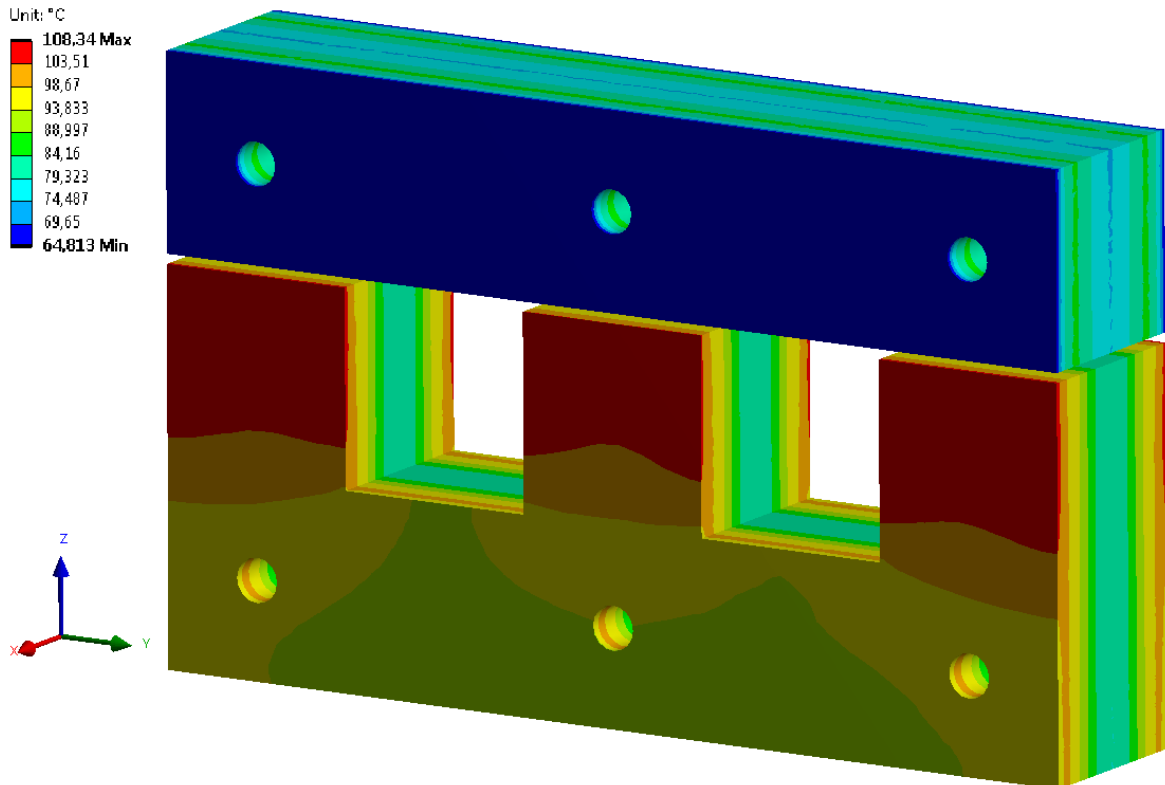
4.5.2 Tlumivka 4 mH

V analytickém návrhu vychází pro nominální proud 4 A oteplení vinutí jedné cívky 45,4 °C při teplotě okolí 60 °C, tedy nejvyšší teplota 105,4 °C. To se liší přibližně o 12 % se získaným oteplením při teplotní analýze v programu ANSYS Mechanical APDL, kde výsledné průměrné oteplení vinutí v ustáleném stavu dosahuje 59,41 °C a průměrná teplota je 119,41 °C. Zde tedy maximální povolená teplota vinutí cívek 125 °C není překročena, ale rezerva není nijak výrazná. Opět při uvažování chyb uvedených pro případ tlumivky 2 mH lze předpokládat, že by oteplení vinutí cívek skutečné tlumivky nemuselo dosahovat takových hodnot. Při pohledu na provedená skutečná měření v bakalářské práci Ondřeje Kloudy (str. 70) vychází oteplení vinutí na povrchu střední cívky 39 °C, tzn. teplota 99 °C, což opět potvrzuje nepřekročení maximální povolené teploty vinutí cívek s dostatečnou rezervou. Obdobné je to i u provedené oteplovací zkoušky pro krátkodobý proud I_{ON} 7 A po dobu 60 s při střídě 40 %, kdy se v tomto režimu teplota vinutí střední cívky ustálí na hodnotě 112 °C, tzn. oteplení 52 °C. Pro tento krátkodobý proud není ani zde provedena teplotní analýza v programu ANSYS Mechanical APDL. Z výsledků provedených oteplovacích zkoušek je pro tuto tlumivku zřejmé, že plně postačuje v celém proudovém rozsahu přirozené chlazení s dostatečnou rezervou do maximální povolené teploty vinutí cívek.



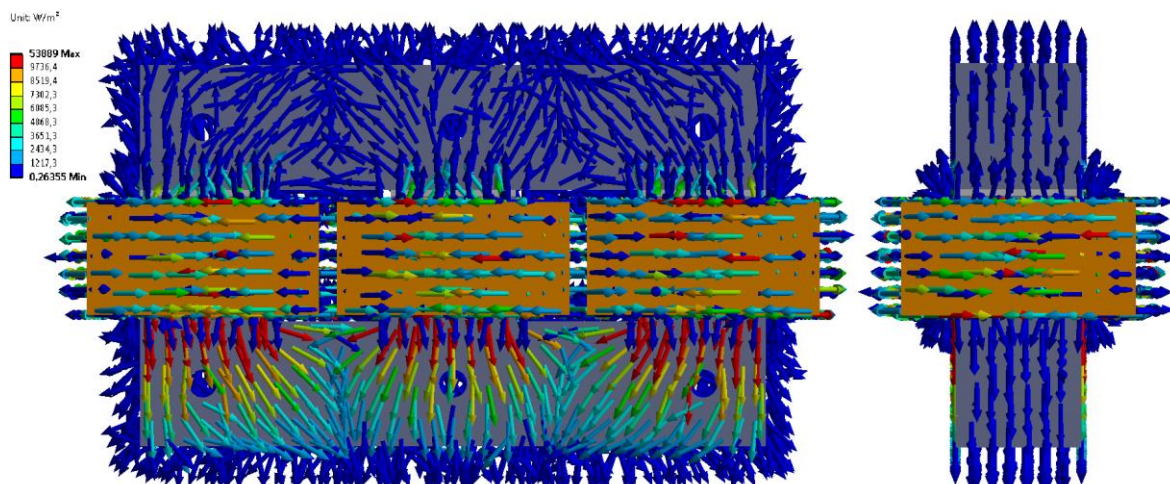
Obr. 28 Rozložení teploty na cívkách tlumivky 4 mH

Průměrná teplota magnetického obvodu pro nominální proud dosahuje $85,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tedy průměrné oteplení je $25,98\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naměřené oteplení v bakalářské práci dosahuje $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, tedy maximální teplota je $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zde se výsledné hodnoty liší se skutečným měřením oteplení magnetického obvodu přibližně o 4 %.



Obr. 29 Rozložení teploty na magnetickém obvodu tlumivky 4 mH

Tepelný tok je vektorově znázorněn na Obr. 30 níže, kde je vidět jakými směry se vznikající teplo šíří. Nejvíce tepla vzniká ve vinutí cívek, které se z nich dále přenáší do magnetického obvodu a okolního vzduchového prostředí.



Obr. 30 Vektorové znázornění tepelného toku tlumivky 4 mH

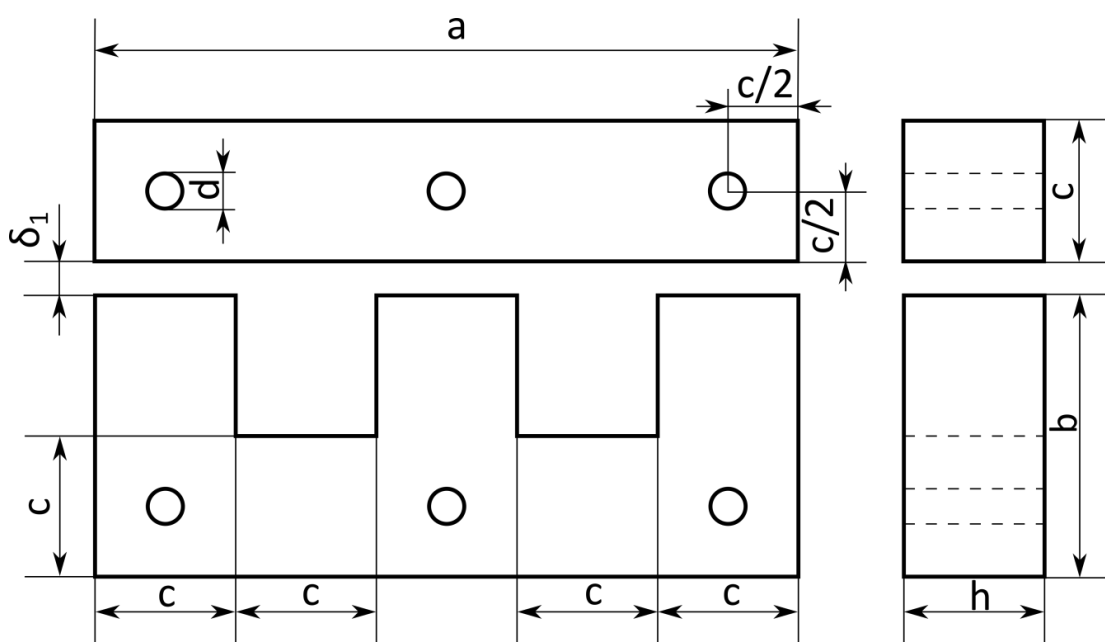
4.6 Mechanická konstrukce

4.6.1 Magnetický obvod

Zadavatelem jsou dány maximální rozměry třífázové tlumivky, které nemohou být překročeny, protože tlumivka bude součástí řídicí jednotky s frekvenčním měničem pro výtahový pohon, jehož rozmístění prvků ve skříni je pevně dané, a tedy neměnné. Tomu bylo nutné přizpůsobit výběr velikosti ocelových plechů magnetického obvodu, jejichž typ je podle jejich výrobce Waasner označen 3 UI 60 / EI 100/100 s tloušťkou 0,5 mm. Zvoleny byly z toho důvodu, že jejich rozměry se nejvíce blíží požadovaným maximálním rozměrům tlumivek, ale zároveň je zde i po nutném zkrácení sloupek ocelových plechů tvaru E dostatek prostoru pro vinutí cívek jednotlivých fází, stahovací a spojovací konstrukci, uchycovací patku a vývody s konektory. Z důvodu rozměrového omezení bude nutné všechny sloupky ocelových plechů tvaru E zkrátit z výrobní výšky 80 mm na upravenou výšku 40 mm. Všechny hodnoty podstatných rozměrů tlumivek, ocelových plechů a magnetického obvodu jsou uvedeny v tabulce Tab. 6 a výkres ocelových plechů, respektive magnetického obvodu se zakótovanými rozměry je na obrázku Obr. 31.

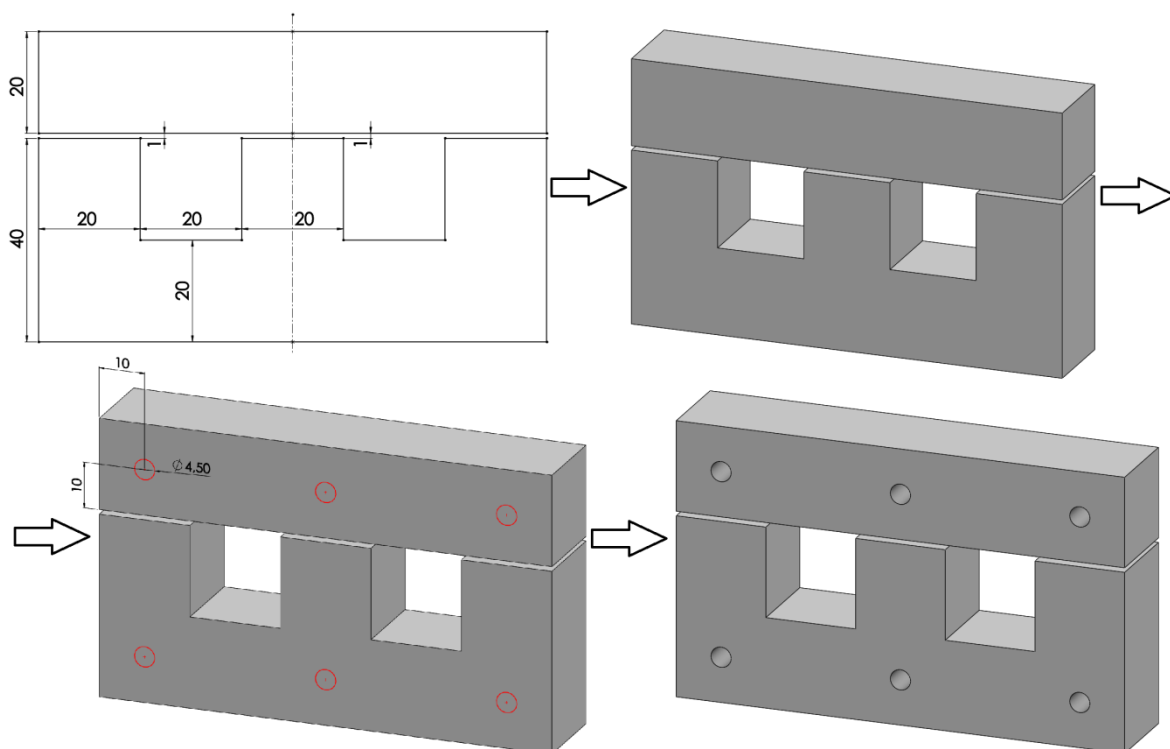
Tab. 6 Rozměry tlumivek, ocelových plechů a magnetického obvodu

Tlumivky	Maximální	Skutečné	Plech	Výrobní	Skutečné	Mag. obvod	Skutečné
šířka (mm)	119	119	a (mm)	100	100	a (mm)	100
výška (mm)	62	61	b (mm)	80	40	b (mm)	40
hloubka (mm)	63	60	c (mm)	20	20	c (mm)	20
			d (mm)	4,5	4,5	d (mm)	4,5
			h (mm)	0,5	0,5	δ_1 (mm)	1
						h (mm)	20



Obr. 31 Zakótování rozměrů ocelových plechů a magnetického obvodu tlumivek

Pro lepší představu jak bude výsledná mechanická konstrukce vypadat je na Obr. 32 uveden postup modelování magnetického obvodu v prostředí programu SolidWorks. Zprvu je např. na přední rovinu nakreslena skica ve tvaru obrysu magnetického obvodu, tedy tvar plechů E a I. Vysunutím skici do prostoru o 20 mm vznikne magnetický obvod s požadovanou hloubkou. Poté je nakreslena další skica s šesti kružnicemi o průměru 4,5 mm, která slouží pro vytvoření otvorů v magnetickém obvodu. Ty slouží ke stažení jednotlivých plechů do kompaktního celku. Odebráním o 20 mm dojde k vytvoření těchto otvorů.



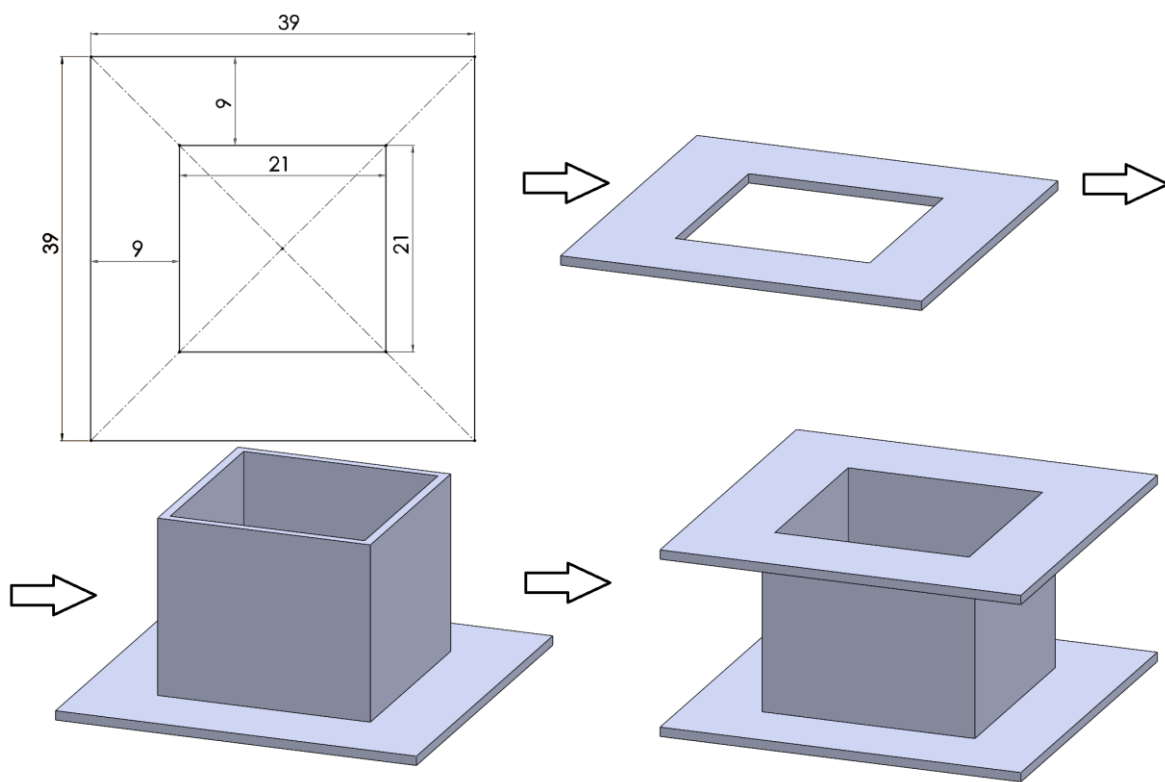
Obr. 32 Zakótování rozměrů ocelových plechů a magnetického obvodu tlumivek

4.6.2 Kostry cívek

Jelikož vybrané běžné dostupné ocelové plechy tvaru E a I je nutné zkrátit z důvodu omezení maximální výšky tlumivek, tak je také nutné zkrátit i kostry, na kterých jsou navinuty cívky. Žádné z běžně dostupných koster, ale nemají požadované rozměry, a proto je nutné buď využít běžně dostupnou kostru s výškou blízké té požadované a tu rozříznutím a následným svařením pomocí páječky používané pro pájení elektroniky nebo okapových spojů. Nebo navrhnout a poté vymodelovat přesně podle požadovaných parametrů kostru v trojrozměrném prostoru v nějakém z 3D CAD modelovacích programů, zde konkrétně pomocí programu SolidWorks. V programu SolidWorks je vymodelování těchto koster otázkou několika málo příkazů, kdy na nějakou z rovin např. přední

nakreslíme skicu, zde konkrétně dva čtverce se shodnými středy souměrnosti. Plocha mezi čtverci bude sloužit pro vysunutí obou čel kostry na tloušťku 1 mm a menší čtverec pro vysunutí tubusu mezi nimi na výšku 18 mm. Výška koster je zvolena s ohledem na zaplnění plochy okna mezi sousedními sloupky vinutím a zároveň s ohledem na to, aby se požadovaný počet závitů a vrstev na kostru vměstnal. Každá tlumivka bude mít všechny 3 kostry cívek shodně vysoké, i když bude odlišný počet závitů krajních a prostřední cívky. Takto vymodelované kostry se uloží ve formátu STL, který je vstupním souborem pro program připravující data pro 3D tiskárnu, tzv. „slicer“. Tento program umožňuje správné nastavení tiskových podmínek pro 3D tiskárnu, kterými jsou výška jedné vytisknuté vrstvy, typ tiskového materiálu, rychlost tisku, hustotu vyplnění tiskovým materiálem, atd. Po správném nastavení vygeneruje „slicer“ G-kód, jehož instrukce přímo řídí pohyb tiskové hlavy a ovládá ostatní prvky 3D tiskárny (vyhřívání podložky, ventilátory, atd.). Jelikož se vinutí cívek otepluje vlivem činných výkonových ztrát způsobených průchodem proudu, tak by materiál pro tisk na 3D tiskárně měl mít teplotu skelného přechodu² vyšší nebo rovnu 125 °C. Pokud by tato teplota byla nižší, mohlo by dojít k změknutí materiálu koster cívek a rozpadu soudržnosti vinutí cívek. Tento požadavek na teplotu skelného přechodu splňují různé materiály na bázi polyamidu, které jsou často obchodně značeny jako nylon. V případě impregnace vinutí cívek impregnačním lakem nebo současně s ním zalévací hmotou není tento požadavek příliš důležitý, protože impregnační lak a zalévací hmota zajistí soudržnost vinutí cívek i při teplotách vyšších než 125 °C. I přesto by měla teplota skelného přechodu materiálu být vyšší, než 100 °C, aby se kostra neroztekla, ale případně pouze změkla a zachovala si svůj tvar.

² Teplota, kdy je ještě materiál sklovitý (tuhý, tvrdý) a není ještě kaučukovitý (elastický)

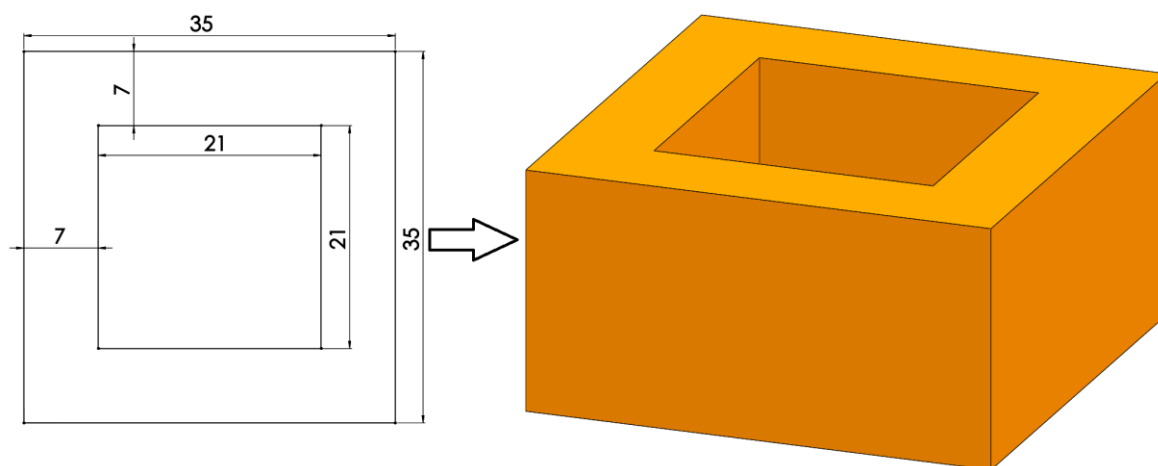


Obr. 33 Skica s kótami a postupem modelování koster cívek v programu SolidWorks

4.6.3 Cívky

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.3.1 a 4.4.1 zabývající se analytickým návrhem a jeho ověřením, varianta se stejným počtem závitů všech cívek není možná. Proto pro tlumivku s indukčností 2 mH jsou navinuty cívky z vodiče o průměru 1,25 mm, včetně izolace 1,316 mm, kde dvě krajní jsou s 67 závitů a jedna prostřední s 65 závitů. Krajní cívky mají 13 závitů v 1 vrstvě z celkových 6 vrstev, kde v poslední vrstvě zůstávají 2 závitů a u prostřední cívky je také 13 závitů v 1 vrstvě z celkových 5 vrstev. Cívky tlumivky s indukčností 4 mH jsou navinuty z vodiče o průměru 1,12 mm, včetně izolace 1,184 mm, kde dvě krajní mají 94 závitů a jedna prostřední má 92 závitů. Krajní cívky mají 15 závitů v 1 vrstvě z celkových 7 vrstev, kde v poslední vrstvě zůstávají 4 závitů a prostřední má též 15 závitů v 1 vrstvě z celkových 7 vrstev, kde v poslední vrstvě zůstávají 2 závitů. Soudržnost vinutí zajišťuje výška koster cívek v axiálním směru a impregnace vinutí cívek impregnačním lakem v radiálním i axiálním směru. Na začátky a konce vinutí cívek je připájen slaněný vodič pro lepší ohebnost a manipulaci při lisování kontaktů konektorů. Slaněný vodič by nebyl nezbytně nutný, ale je požadován zadavatelem a také zadavatelem požadované kontakty konektorů jsou určeny podle jejich výrobce pouze pro lisování slaněných vodičů.

Cívka je vymodelována značně zjednodušeně jako kvádr s čtvercovým otvorem. Modelování jednotlivých závitů ve vrstvách je složité a pro účel pouhé představy o skutečném provedení zbytečné. Opět je nakreslena skica na přední rovinu, která je tvořena dvěma čtverci se shodnými středy souměrnosti. Plocha mezi čtverci slouží k vysunutí o 18 mm, čímž vznikne zjednodušené vinutí cívky.

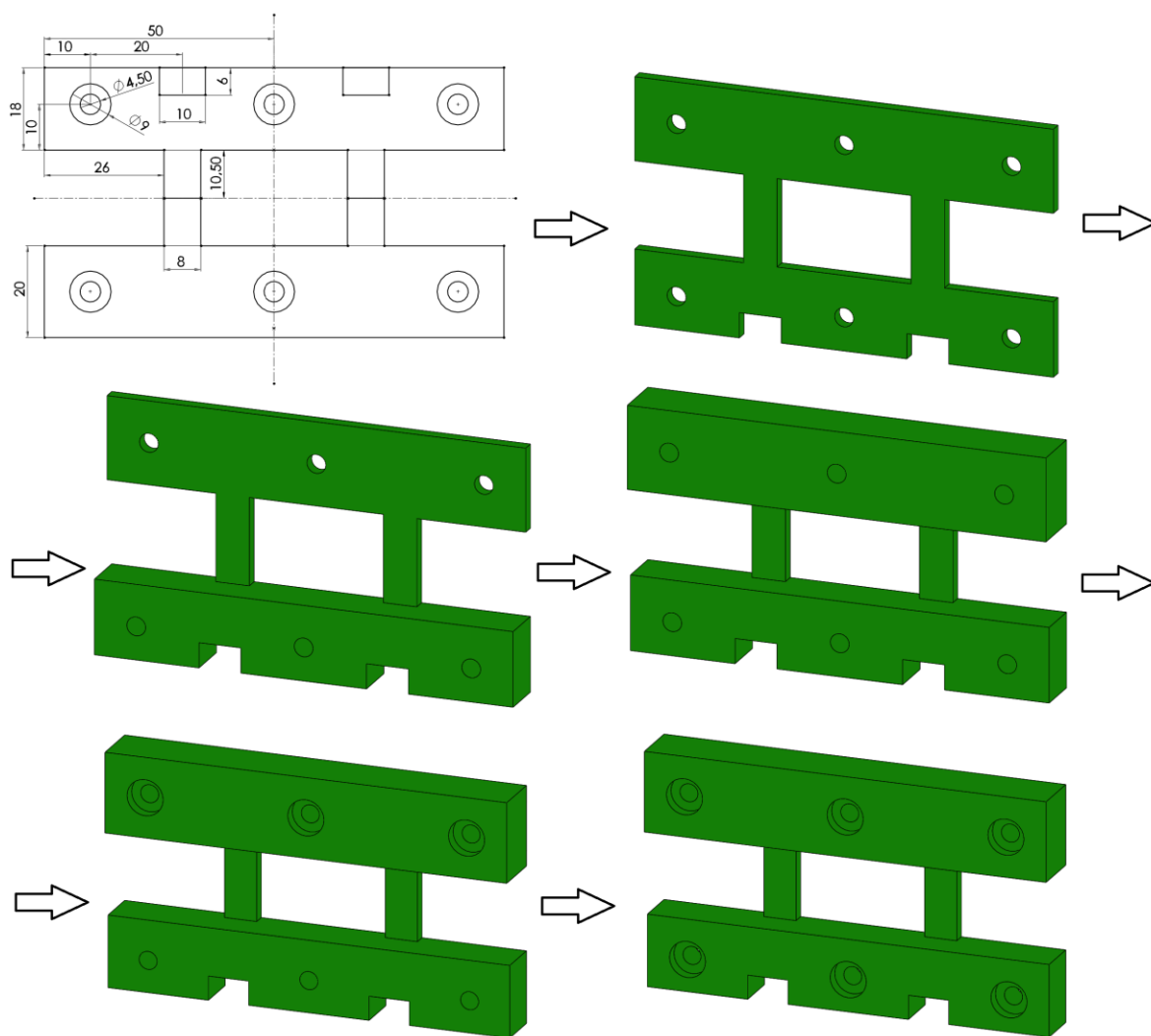


Obr. 34 Skica s kótami a postupem modelování cívky v programu SolidWorks

4.6.4 Spojovací konstrukce

Magnetický obvod tlumivek je tvořen ocelovými plechy tvaru E a I, který kvůli potřebné vzduchové mezeře nemůže být sestaven obvyklým způsobem. Obvykle jsou v každé vrstvě skládaného magnetického obvodu plechy tvaru E a I na opačné pozici, než ve vrstvě předešlé. Díky tomu při sešroubování dojde k vytvoření soudržného magnetického obvodu. V případě požadované vzduchové mezery je zvlášť sešroubována část magnetického obvodu z plechů tvaru E a zvlášť část z plechů tvaru I, které je nutné uspořádat do soudržného magnetického obvodu s neměnnou vzduchovou mezerou. Soudržnost takového magnetického obvodu bude zajištěna vymodelovanou konstrukcí v programu SolidWorks a poté vytisknuta 3D tiskárnou. Opět nakreslíme skicu na přední rovinu, která bude již složitější. Jedním vysunutím o 3 mm vytvoříme základní kostru spojovací konstrukce s šesti otvory průměru 4,5 mm pro uchycení plechů a dvěma obdélníkovými výřezy pro hlavy šroubů, které uchycují patku tlumivek ke skříni. Dalším vysunutím o 8 mm vytvoříme blok držící plechy tvaru E s rezervou pro uchycovací patku tlumivek. Posledním vysunutím o 10 mm vytvoříme blok držící plechy tvaru I. Poté jedním 3 mm odebráním s průměrem 9 mm vytvoříme zahlobení pro matice velikosti M4, které stahují plechy tvaru I a druhým 3 mm odebráním s průměrem 9 mm vytvoříme zahlobení pro matice velikosti M4, které stahují plechy tvaru E. Vymodelovanou spojovací

konstrukci opět uložíme ve formátu STL a pomocí „sliceru“ vygenerujeme data pro 3D tiskárnu. Zvolený materiál pro tisk této spojovací konstrukce by měl, vzhledem k činným výkonovým ztrátám a s tím spojeným oteplením vinutí a magnetického obvodu, mít opět teplotu skelného přechodu vyšší nebo rovnu 125 °C (viz kapitola 4.6.2). V tomto případě je výběr materiálu mnohem důležitější z důvodu zachování konstantní velikosti vzduchové mezery, jejíž změna by vyvolala změnu indukčnosti jednotlivých fází, což je nežádoucí.

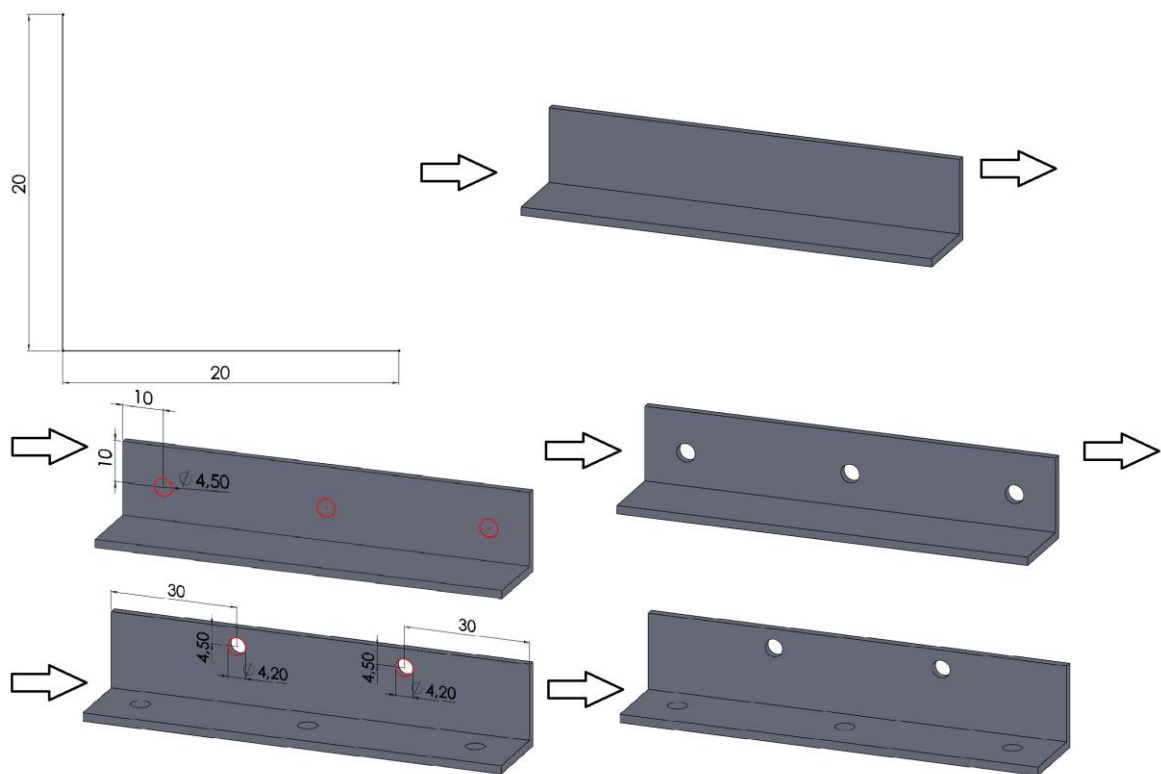


Obr. 35 Skica s kótami a postupem modelování spojovací konstrukce v programu SolidWorks

4.6.5 Uchycovací patka

Uchycovací patka slouží pro uchycení tlumivek ke skříni řídicí jednotky. Bude tvořena dvěma ocelovými 90° úhelníky vytvořených z ohnutého plechu tloušťky 2 mm. Podle požadavků na 4 uchycovací otvory budou v každém úhelníku vyvrtány dva otvory o průměru o něco větším, než 4 mm, aby šrouby velikosti M4 s imbusovou hlavou měly v otvoru určitou radiální vůli. Úhelníky budou bez prolisu, které sice nezajistí vyšší tuhost,

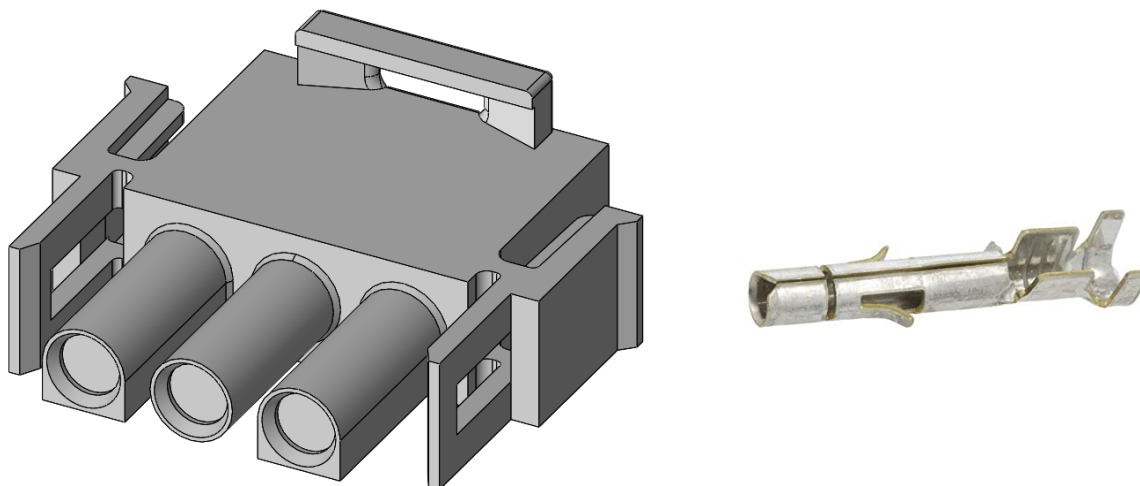
ale vzhledem k přiléhající spojovací konstrukci, omezeným prostorovým možností a jeho obtížné výrobě běžné dostupnými nástroji budou postačovat. Úhelníky jsou opět vymodelovány programem SolidWorks, tentokrát nikoliv z důvodu jejich tisku 3D tiskárnou, ale z důvodu lepší představy toho, jak bude celková mechanická konstrukce reálně vypadat. Na přední rovinu nakreslíme skicu ve tvaru profilu 90° úhelníku, což připomíná tvar písmene L, kde mají obě ramena délku 20 mm. Vysunutím o 100 mm vytvoříme úhelník požadované délky. Na ploše jednoho z ramen nakreslíme další skicu, která bude sloužit pro odebrání 2 mm materiálu a vytvoření třech otvorů o průměru 4,5 mm pro uchycení k magnetickému obvodu. Na ploše druhého ramene nakreslíme skicu sloužící pro odebrání 2 mm materiálu a vytvoření dvou otvorů o průměru 4,2 mm pro uchycení ke skříni řídicí jednotky.



Obr. 36 Skica s kótami a postupem modelování uchycovací patky v programu SolidWorks

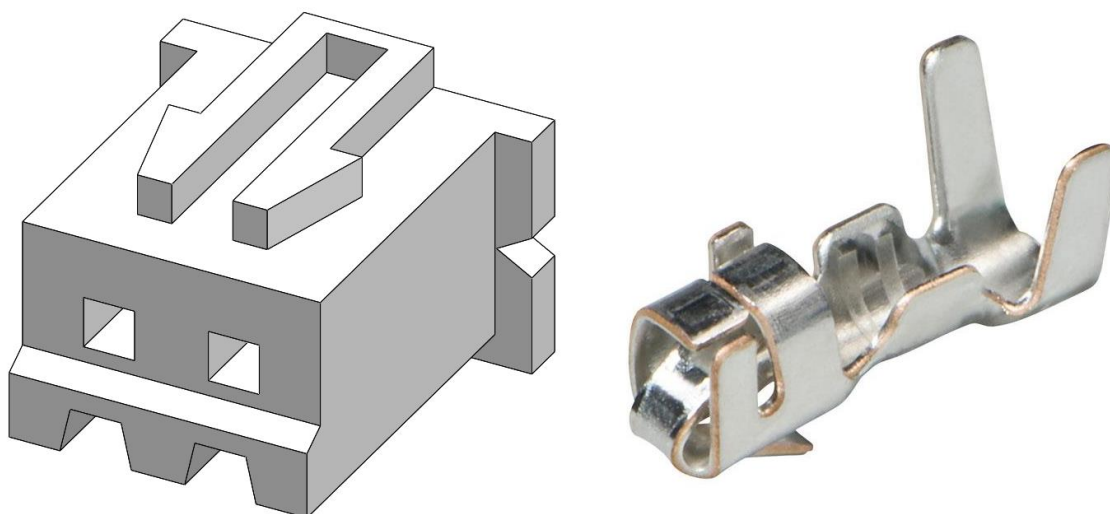
4.6.6 Konektory

Pro připojení začátků vinutí cívek, které budeme považovat za vstupní stranu tlumivek a konců vinutí cívek jako stranu výstupní, byly zvoleny doporučené konektory zadavatelem. Konektory jsou konkrétně s označením 350766-4 a lisovací kontakty pro ně s označením 926882-1 od výrobce TE Connectivity (viz Obr. 37).



Obr. 37 Konektor začátků a konců vinutí cívek s jeho kontaktem

Pro snímání teploty vinutí prostřední cívky tlumivek bylo vybráno platinové odporové teplotní čidlo Pt1000 z důvodu jeho lineární závislosti rezistance na teplotě. Konektor pro připojení vývodů teplotního čidla byl také zvolen dle požadavku zadavatele s označením XHP-2 a lisovací kontakty pro něj s označením SXH-001T-P0.6 od výrobce JST (viz Obr. 38).

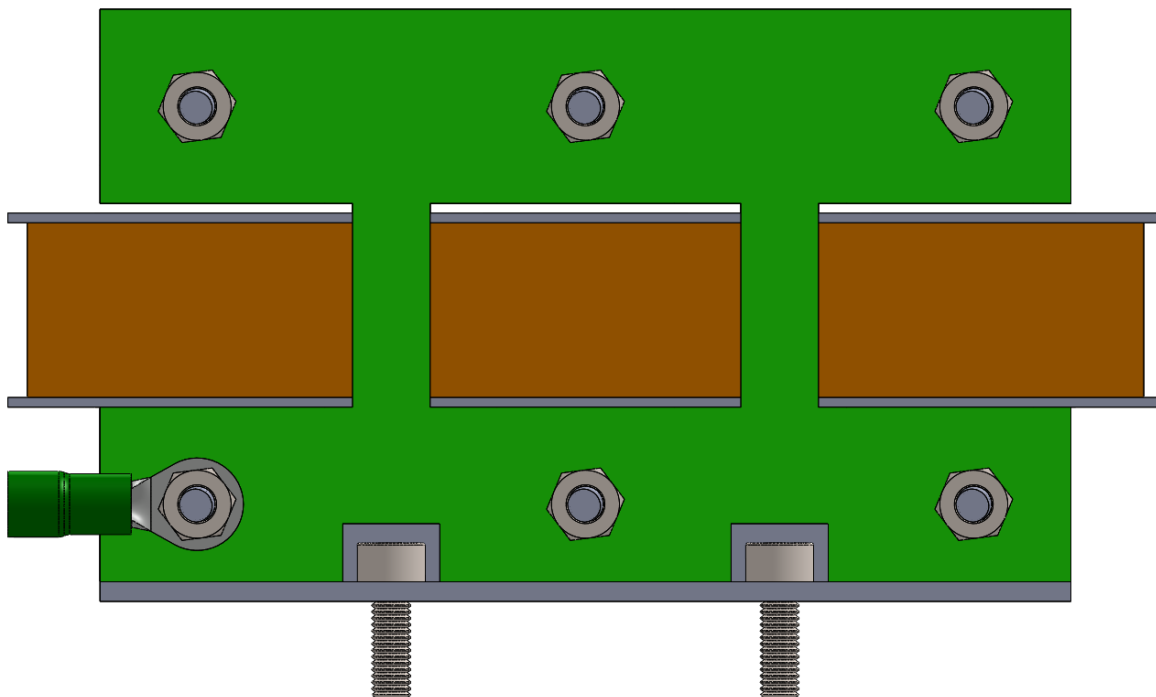


Obr. 38 Konektor a jeho kontakty vývodů termistoru

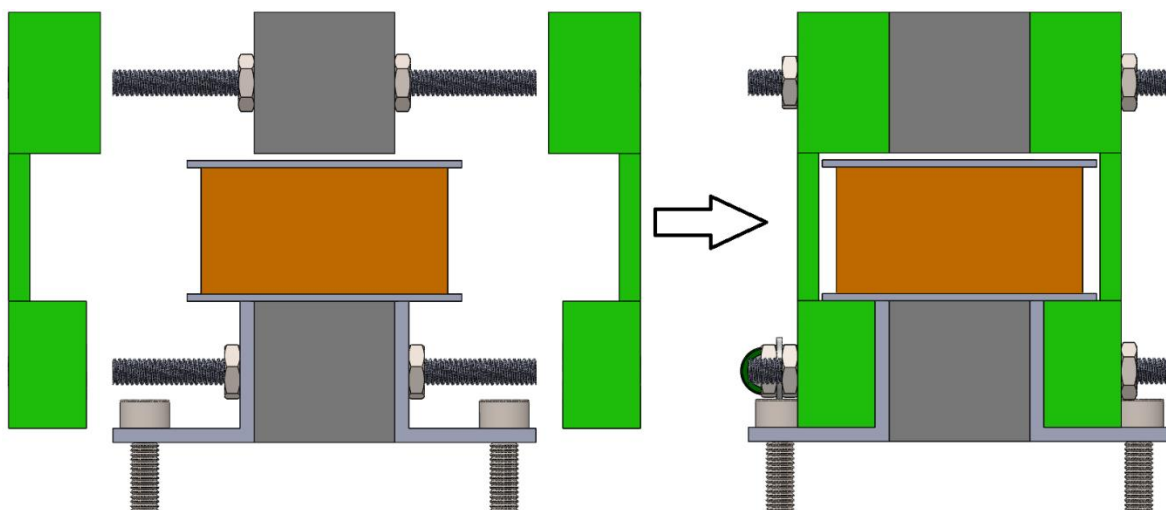
4.6.7 Výsledná mechanická konstrukce

Popis postupu modelování je uveden pro ty mechanické součásti, které nejsou běžně na trhu dostupné a je potřeba je vyrobit samostatně, respektive vytisknout na 3D tiskárně. Na Obr. 39 je v prostředí programu SolidWorks pohled zepředu a na Obr. 40 pravý pohled, kde jsou z důvodu přehlednosti skryty vodiče a konektory. Obr. 41 níže pak zobrazuje návrh toho, jak by mohla výsledná mechanická konstrukce tlumivek vypadat při jejich

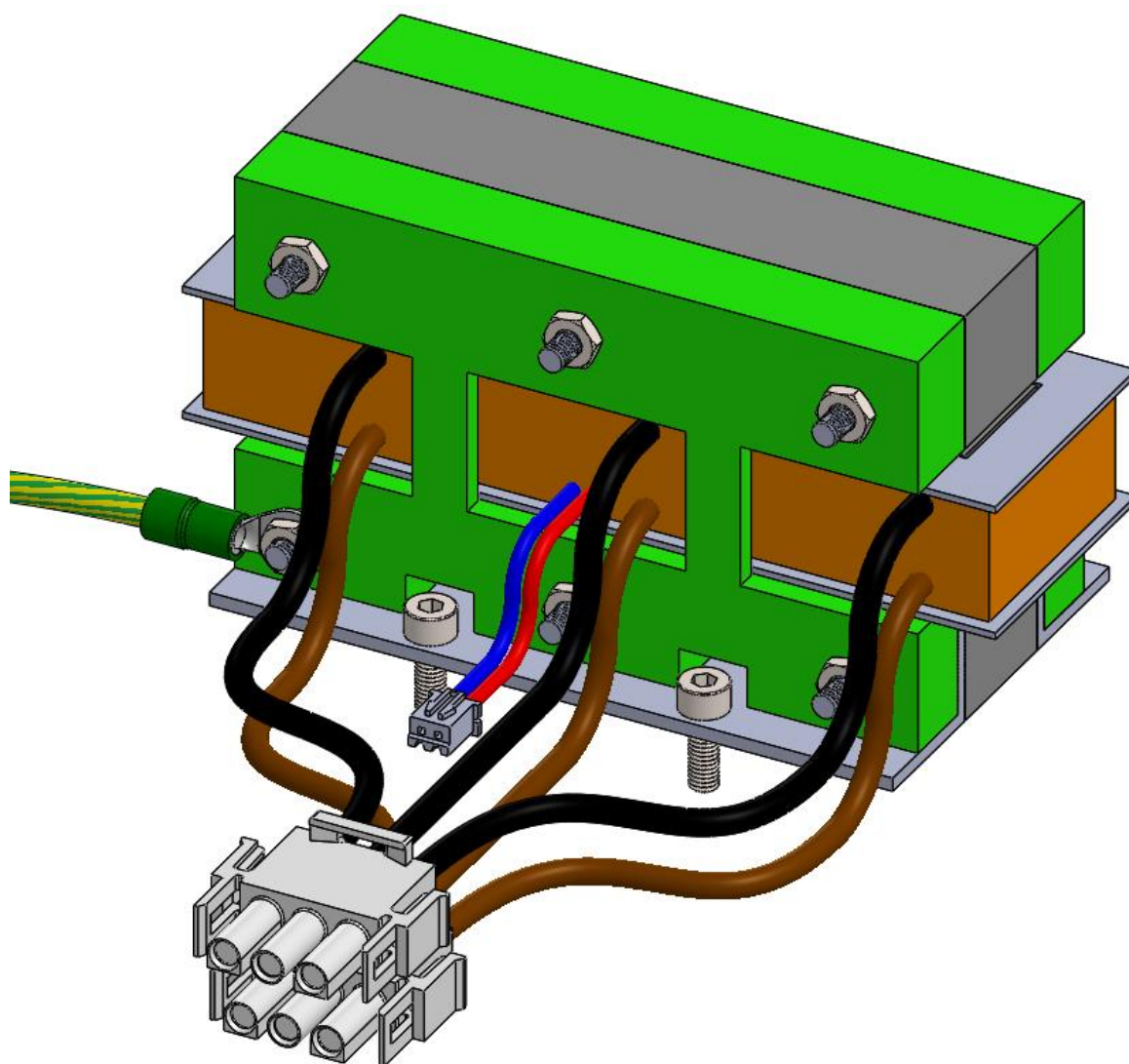
reálné sériové výrobě. Pro stažení ocelových plechů tvaru E a I jsou využity závitové tyče s nízkými maticemi o velikosti závitu M4. Pro zamezení vzájemného vodivého spojení ocelových plechů závitovými tyčemi, a tedy omezení činných výkonových ztrát vířivými proudy, jsou na ně z každé strany nasunuty izolační průchodky. Závitové tyče mají záměrně větší přesah, protože jsou dále použity pro připevnění uchycovací patky sloužící pro uchycení tlumivek ke skříni řídicí jednotky. Spojovací konstrukce ocelových plechů tvaru E a I, která zároveň udržuje konstantní vzduchovou je také připevněna s využitím přesahu závitových tyčí. Pro bezpečnost a zajištění ochrany před možným nebezpečným dotykovým napětím, které by se mohlo objevit na kovových částech tlumivek (např. při poruše izolace vinutí cívek nebo přírodních slaněných vodičů) je nutné vytvořit vodivé propojení pokud možno všech kovových součástí a zajistit jejich připojení na ochranný vodič PE. Vodivé propojení kovových součástí je zajištěno závitovými tyčemi s výjimkou magnetického obvodu, který spojit nelze z důvodu ztrát vířivými proudy. Na odizolovaný konec zelenožlutého ochranného vodiče je lisovacími kleštěmi nalisováno kabelové oko, které je nasazeno na závitové tyči a přišroubováno maticemi přes vějířové podložky. Dále na odizolované konce slaněných vodičů vstupní a výstupní strany tlumivek jsou lisovacími kleštěmi nalisovány kontakty konektorů 350766-4 pro připojení tlumivek k řídicí jednotce. Na odizolované konce vývodů odporového platinového teplotního čidla jsou také nalisovány kontakty konektoru XHP-2, který je též připojen k řídicí jednotce.



Obr. 39 Pohled zepředu na výslednou mechanickou konstrukci tlumivek se skrytými vodiči



Obr. 40 Pravý pohled na výslednou mechanickou konstrukci tlumivek se skrytými vodiči



Obr. 41 Návrh výsledné mechanické konstrukce tlumivek pro jejich sériovou výrobu

5 Kontrolní měření

Měření na prototypch tlumivek nejsou z důvodu omezení osobní přítomnosti v laboratoři provedena, ale jsou zde popsána ta, která by případně provedena byla.

5.1 Měření indukčnosti

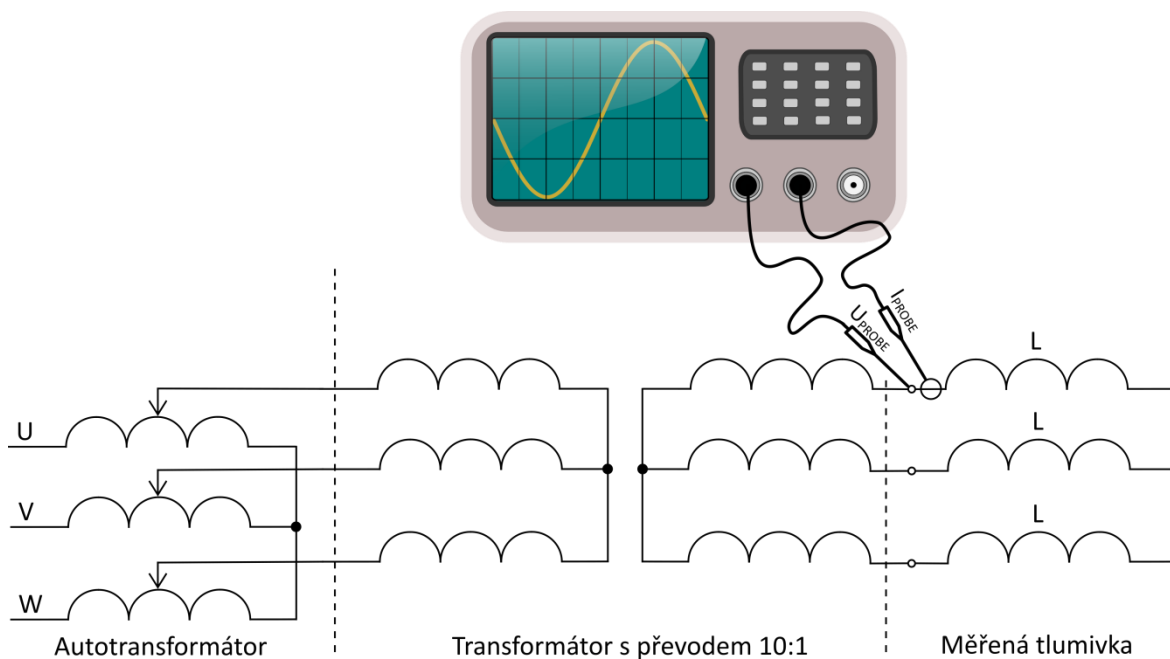
Měření indukčnosti cívek 3 fázové tlumivky je možné provést spojením konců vinutí cívek do jednoho uzlu, tzn. do hvězdy. Začátky vinutí cívek jsou napájeny střídavým harmonickým napětím z 3 fázového autotransformátoru nebo indukčního regulátoru (natáčivý transformátor, tzv. booster). Regulace jejich napětí je sice plynulá, ale nastavení požadované hodnoty napětí může být někdy obtížné. Proto je použit ještě 3 fázový transformátor s převodem 10:1, který nastavení ulehčí tím, že regulované napětí nastavujeme 10krát vyšší, než je požadované na straně napájení 3 fázové tlumivky. Na místě 3 fázového transformátoru také mohou být reostaty, na kterých ale zbytečně vznikají činné výkonové ztráty. Jako měřicí přístroj je nejjednodušší využití digitálního multimetru (analyzátoru sítě), který současně měří v každé fázi napětí, proud a účinník nebo přímo činný a jalový výkon. To splňuje v laboratoři dostupný digitální multimetr DMK 32 od výrobce LOVATO Electric, který však měří fázové napětí od 10 V výše, což neumožňuje změření závislosti indukčnosti na proudu v celém proudovém rozsahu. Proto je nutné použít pro měření digitální osciloskop, který umožňuje měření napětí již od milivoltů. Toto měření je náročnější na pečlivost a čas, protože osciloskopy mají obvykle nejvýše 4 vstupní kanály a nelze tak najednou odečíst hodnotu napětí, proudu a fázového posunu v každé fázi. Mezi dvěma fázemi je tedy nutné pro každou hodnotu proudu přepojovat napěťovou a proudovou osciloskopickou sondu, což měření prodlužuje a vyžaduje vyšší pečlivost. Ve schématu zapojení na Obr. 42 je pro přehlednost zakreslena jen jedna napěťová a proudová osciloskopická sonda.

Postup měření je tedy takový, že požadovanou hodnotu proudu vinutím cívek tlumivky dosáhneme jemu odpovídajícím napětím nastaveným pomocí autotransformátoru. Po nastavení požadovaného proudu odečteme buď z osciloskopu přímo, nebo pomocí kurzorů a následného přepočtu efektivní hodnotu napětí a proudu. Fázový posun počítá osciloskop přímo nebo ho vypočteme podle rovnice (30) ze známé periody a časového úseku mezi napětím a proudem, kdy prochází nulou. Indukčnost se pak vypočítá jednoduše

podle rovnice (31). Tento postup opakujeme pro celý proudový rozsah tlumivky, čímž následně získáme závislost indukčnosti všech cívek tlumivky na proudu.

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \Delta t \cdot f \text{ (rad)}, \varphi = 360 \cdot \Delta t \cdot f \text{ (}^\circ\text{)} \quad (30)$$

$$L = \frac{U \cdot \sin(\varphi)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I^2} \quad (31)$$

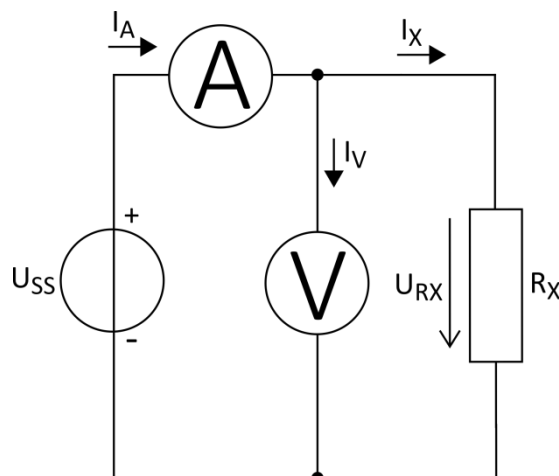


Obr. 42 Schéma zapojení pro měření indukčnosti 3 fázové tlumivky

5.2 Měření odporu vinutí cívek

Pro měření odporů vinutí cívek lze využít nepřímou Ohmovu metodu pro malé odpory. Pokud chceme změřit pouze odpor vinutí, je nutné použít stejnosměrný napájecí zdroj. Při použití střídavého napájecího zdroje by se kvůli nenulové frekvenci projevila i induktivní reaktance cívky, případně parazitní kapacitní reaktance. V tomto zapojení narůstá přesnost celého měření s klesající velikostí měřeného rezistoru R_X s neznámým odporem, protože proud raději poteče neznámým rezistorem, než paralelně připojeným voltmetrem s vysokým odporem (ideálně nekonečným). Při vyšším neznámém odporu rezistoru R_X by tekla voltmetrem větší proud, který by způsobil vyšší oteplení, následné zvýšení jeho odporu a nakonec odchylku od výrobcem udávané hodnoty odporu voltmetru. Odpor vinutí vypočítáme nepřímo z voltmetrem a ampérmetrem naměřeného napětí a proudu podle rovnice (32).

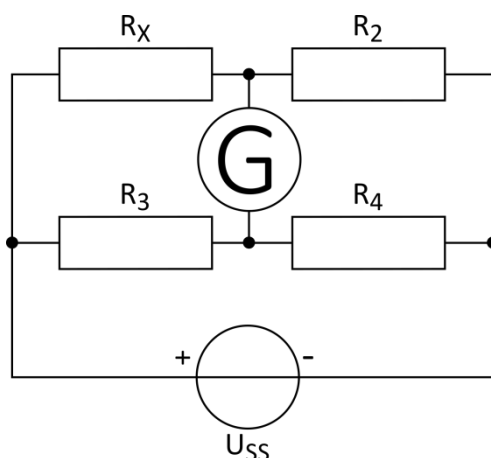
$$R_X = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}} \quad (32)$$



Obr. 43 Schéma zapojení pro nepřímé měření malých odporů Ohmovou metodou

Další možností je změřit odpor vinutí cívek nepřímou můstkovou metodou, konkrétně pomocí Wheatstoneova můstku. Rezistory R_3 , R_4 jsou odporové normály (etalony) a rezistor R_2 je normálová odporová dekáda či reostat, kde u všech známe hodnotu jejich odporu. Neznámý je odpor rezistoru R_X , který hledáme. Princip spočívá ve vyrovnání napětí na rezistorech R_3 a R_X a zároveň na rezistorech R_2 a R_4 . Toho je dosaženo pomocí změny odporu normálové odporové dekády či reostatu a sledováním výchylky galvanometru či jiného nulového indikátoru. Jakmile se tato napětí vyrovnají, neteče žádný proud galvanometrem a má tedy nulovou výchylku. Pak platí výpočetní vztah (33) neznámého odporu rezistoru R_X .

$$R_X = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_2 \quad (33)$$



Obr. 44 Schéma zapojení můstkového měření odporů Wheatstoneovým můstkem

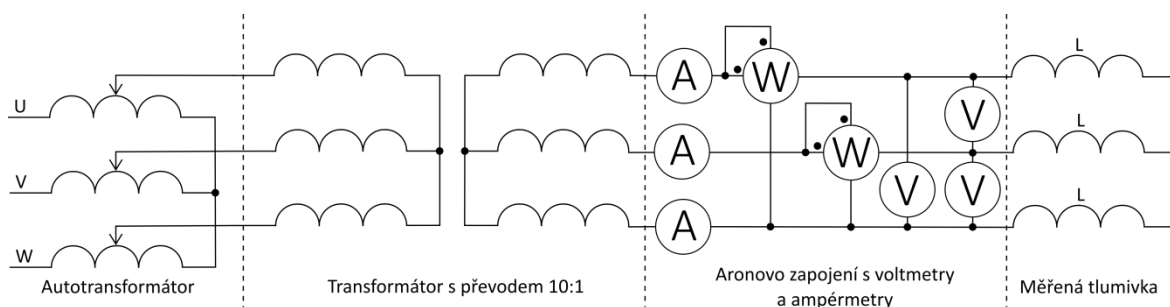
5.3 Měření naprázdno

Měření naprázdno 3fázové tlumivky je provedeno shodně s měřením transformátoru naprázdno. Zjistíme při něm činné výkonové ztráty naprázdno v magnetickém obvodu a vinutí cívek, celkový účinník, magnetizační charakteristiku a magnetizační proud. Pomocí autotransformátoru měníme s vhodným krokem velikost napájecího napětí a v oblasti nasycení magnetického obvodu krok zjermíme. Celkové činné výkonové ztráty naprázdno jsou dány součtem naměřených hodnot wattmetry v Aronově zapojení. Ampérmetry slouží k měření fázových proudů, jejichž hodnoty spolu se změřenými odpory vinutí slouží k výpočtu činných výkonových ztrát ve vinutí podle rovnice (34). Z celkových činných výkonových ztrát naprázdno a činných výkonových ztrát ve vinutí cívek lze podle rovnice (35) vypočítat činné výkonové ztráty v magnetickém obvodu. Celkový účinník je vypočítán ze změřených sdružených napětí a fázových proudů podle rovnice (36). V průběhu měření odečítáme naměřené hodnoty ze všech ampérmetrů, voltmetrů a wattmetrů. Schéma zapojení je znázorněno na Obr. 45.

$$\Delta P_{J0} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 \quad (34)$$

$$\Delta P_0 = \Delta P_{J0} + \Delta P_{Fe} \quad (35)$$

$$\lambda = \frac{\Delta P_0}{\sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_F} \quad (36)$$



Obr. 45 Schéma zapojení pro nepřímé měření malých odporů Ohmovou metodou

5.4 Měření oteplení

Oteplení vinutí cívek a magnetického obvodu lze změřit s využitím termočlánků různého typu (např. typu K či T), jejich výběr závisí na měřených teplotách. Termočlánky se umístí a připevní na povrch vinutí cívek a magnetického obvodu a zapojí se do zařízení, které dokáže zaznamenávat průběh oteplení v čase s určitou periodou odečtu hodnoty. Kontakt s povrchem vinutí cívek a magnetického obvodu musí být těsný, aby nedocházelo

ke zkreslení naměřených hodnot oteplení. To může být zajištěno lepicí páskou či vhodným lepidlem.

Jinou možností změření oteplení je využití termokamery, čímž zjistíme rozložení teploty a následně oteplení po celém povrchu vinutí cívek a magnetického obvodu. Tím v porovnání s měřením pomocí termočlánků získáme mnohem lepší představu o celkovém oteplení všech částí tlumivky, ale pořizovací náklady jsou u termokamery násobně vyšší.

Závěr

Dosažení shodné indukčnosti cívek v jednotlivých fázích tlumivky v požadovaném pásmu tolerance pro celý rozsah proudového zatížení u obou tlumivek bylo zpočátku zamýšleno pomocí větší vzduchové mezery u střední větve magnetického obvodu, který má tvar písmene E. Zároveň by tak mohl být počet závitů všech cívek shodný a z hlediska jednoduchosti a finanční nákladů při sériové výrobě by to bylo výhodné řešení. Při analytickém návrhu se však toto ukázalo jako obtížně splnitelné, protože by to vyžadovalo vzduchovou mezeru větší o 16 μm , což by vyžadovalo velice přesnou raznici při výrobě feromagnetických plechů tvaru písmene E. Z normy byla zjištěna rozměrová tolerance při výrobě takových plechů, která se pohybuje okolo 0,175 mm, což je o jeden řád vyšší hodnota, než potřebný rozdíl vzduchových mezer. Tento fakt byl ještě následně ověřen a potvrzen metodou konečných prvků v programu ANSYS Maxwell, z kterého vzešla větší hodnota vzduchové mezery o 40 μm , což je stále pod výrobní tolerancí. To vedlo k možnosti, kdy je vzduchové mezera ve všech větvích magnetického obvodu shodná a shodné indukčnosti v jednotlivých fázích tlumivky je dosaženo pomocí shodného počtu závitů krajních cívek a nižšího počtu závitů u cívky střední. Vhodný počet závitů byl zjištěn simulací v programu ANSYS Maxwell. Po nalezení vhodného počtu bylo u obou tlumivek ověřeno a potvrzeno, že je v celém proudovém rozsahu indukčnost v požadovaném pásmu tolerance a že se mezifázově příliš neliší.

Pro obě tlumivky byla provedena teplotní analýza pro nejnepříznivější možnou situaci s okolní teplotou 60 °C a nadmořskou výškou 1200 m, kde bylo zjištěno oteplení vinutí cívek a magnetického obvodu při jmenovitém proudu. U tlumivky 2 mH byla překročena maximální povolená teplota vinutí 125 °C, což bylo potvrzeno i skutečným měřením oteplení obdobné tlumivky v bakalářské práci Ondřeje Kloudy. Při zadaných maximálních rozměrech tlumivek je však jediná možnost snížení oteplení pomocí nuceného chlazení. U tlumivky 4 mH maximální povolená teplota vinutí překročena nebyla, což potvrzuje i měření oteplení v bakalářské práci a je tedy dostačující zadavatelem požadované přirozené chlazení.

Jelikož je nutná v magnetickém obvodu z plechů tvaru E a I vzduchová mezera není možné jej složit běžným způsobem, kde jsou v každé vrstvě pozice E a I plechů střídány.

Při jejich sešroubování pak dojde k vytvoření soudržného magnetického obvodu. Zde jsou zvláště sešroubovány plechy tvaru E a I, které je nutné uspořádat do soudržného magnetického obvodu s neměnnou vzduchovou mezerou, což je zajištěno navrženou a vymodelovanou spojovací konstrukcí. Kromě spojovací konstrukce jsou v 3D modelovacím programu SolidWorks vymodelovány i zbylé části tlumivek pro lepší představu výsledné mechanické konstrukce.

Ověření indukčnosti cívek tlumivek v jednotlivých fázích, oteplení, činných výkonových ztrát a rezistancí vinutí na skutečných prototypch tlumivek s navrženými parametry provedeno není, ale jsou zde alespoň uvedena. Kontrolní měření provedena nebyla z důvodu celosvětové pandemie koronaviru SARS-CoV-2 a s tím spojeným omezeným pohybem osob a přístupem do laboratoří fakulty elektrotechnické.

Práce by v budoucnu mohla být rozšířena o skutečné zkonstruování prototypů obou tlumivek s navrženými parametry. Následně by se na zkonstruovaných tlumivkách provedla kontrolní měření především indukčnosti a oteplení, která by ověřila, zdali je skutečně dosaženo požadovaných parametrů. Na základě naměřených dat a jejich vyhodnocení by se v případě vyhovění všem požadavkům mohla zahájit sériová výroba, případně by se některé parametry upravily, měřením ověřily a následně se zahájila sériová výroba.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SYKORA, Julian. *Line Reactor Design Requirement Specification For Next Ultra Drive – Smart Drive Board (SDB)*. Berlin, 2018. [Cit. 2. 2. 2021]
- [2] ANSYS, Inc. *Maxwell Help*. Canonsburg, Pensylvánie, 2020. [Cit. 12. 4. 2021]
- [3] KLOUDA, Ondřej. *Vliv konstrukce magnetického obvodu na indukčnost a ztráty tlumivky* [online]. Plzeň, 2020 [Cit. 26. 2. 2021]. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky. Vedoucí práce Bohumil Skala. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/41737/1/Bakalarska_prace_Klouda_Ondrej.pdf
- [4] SUCHÁNKOVÁ, Lenka. *Tepelné ztráty kotle na biomasu* [online]. Brno, 2019 [Cit. 24. 5. 2021]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Petr Kracík. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116006>
- [5] JANÁK, Jan. *Modelování přechodových dějů při vypínání blízkých zkratů v sítích vvn* [online]. Ostrava, 2014 [Cit. 31. 3. 2021]. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Zdeněk Hytka. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/94758424.pdf>
- [6] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita* [online]. Brno, 2002 [Cit. 5. 4. 2021]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Dostupné z: https://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC_skripta.pdf
- [7] DĚDKOVÁ, Jarmila a Tomáš KRÍŽ. *Modelování elektromagnetických polí (MEM): přednášky: počítačová cvičení* [online]. Brno, 2012 [Cit. 21. 4. 2021]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky. ISBN 978-80-214-4401-0. Dostupné z: <http://docplayer.cz/107989386-Modelovani-elektromagneticky-poli-mmem.html>
- [8] JANOVSÁ, Drahošlava. *Metody aplikované matematiky* [online]., Praha, 2021 [Cit. 21. 4. 2021]. VŠCHT Praha, Ústav matematiky. Dostupné z: https://old.vscht.cz/mat/MAM/FEM_UM.pdf
- [9] HOLEČEK, Oldřich a Dalimil ŠNITA. *Sdílení tepla* [online]. Praha, 2019 [Cit. 24. 5. 2021]. VŠCHT, Praha. Ústav chemického inženýrství. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/uchi/ped/chi/chi.ii.ulohy.k11.sdileni.tepla.pdf>
- [10] voestalpine Stahl GmbH, 2018 [online]. *Data sheet isovac 235-35 A*. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: https://www.voestalpine.com/division_stahl/content/download/39689/456867/file/DB_isovac_235-35A_E_281015.pdf
- [11] Gebrüder Waasner Elektrotechnische Fabrik, 2020 [online]. *Katalog Waasner 01 2020*. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: http://www.waasner.de/fileadmin/Assets/PDFs/Katalog_Waasner_01_2020.pdf
- [12] Therma FM, s.r.o., 2017 [online]. *Katalog vinutých magnetických jader vyráběných firmou Therma FM*. [Cit. 3. 4. 2021]. Dostupné z: <http://thermaf.com/upload/files/5a7ad213874d9/Katalog-CZ-2017-marketing.pdf>
- [13] Siran 3D Evolution, 2021. Blog. G-CODE, jádro 3D tisku. In: *Vše pro 3D tisk* [online]. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/s/gcode1>
- [14] ONDRÁČEK, Jan, Josef SZÜCS, Martin ŠTASTNÝ a Libor ZELÉNKA. *Zalévání vinutí – nový trend v navijení elektromotorů*. Elektro [online]. Praha:

- FCC Public, 2019, 13. 6. 2019, 2019(6), 48-50 [Cit. 26. 2. 2021]. ISSN 1210-0889. Dostupné z:
http://www.odbornecasopisy.cz//flipviewer/Elektro/2019/06/Elektro_06_2019/index.html#p=48
- [15] KABEŠ, Karel. Odlévané cívky pro elektrické stroje. *Elektro* [online]. Praha: FCC Public, 2016. 2016(5), 52 [Cit. 5. 4. 2021]. ISSN 1210-0889. Dostupné z:
http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/05/Elektro_05_2016/index.html#p=52
- [16] PANKRÁČ Vítězslav. Často používané aplikace tlumivek v silnoproudé elektrotechnice; Tlumivky v silnoproudé elektrotechnice (Část 2). *Elektrorevue* [online]. Brno: International Society for Science and Engineering, o.s., 2010 [Cit. 2021-04-06]. ISSN 1213-1539. Dostupné z:
<http://www.elektrorevue.cz/cz/download/casto-pouzivane-aplikace-tlumivek-v-silnoproude-elektrotechnice/>
- [17] *Nylon*, 2021 [online]. Wikipedia. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Nylon>
- [18] *Kostra cívky*, 2021 [online]. Wikipedia. [Cit. 3. 4. 2021]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Kostra_civky
- [19] *Inductor*, 2021 [online]. Wikipedia. [Cit. 31. 3. 2021]. Dostupné z:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Inductor>
- [20] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. NESTACIONÁRNÍ MAGNETICKÉ POLE. *Encyklopedie fyziky*, 2007 [online]. [Cit. 31. 3. 2021]. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/301-nestacionarni-magneticke-pole>
- [21] Publi.cz, 2020. Přejížděcí teploty polymerů. In: Publi.cz [online]. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/06.html>
- [22] Publi.cz, 2021. Speciální termoplasty pro náročné aplikace. In: Publi.cz [online]. [Cit. 3. 4. 2021]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/19.html>
- [23] Materialpro3d.cz, 2020. Materiálový slovník. Nylon materiál pro 3D tiskárny [online]. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z:
<https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/nylon/>
- [24] DigitalDutch.com, 2021. 1976 Standard Atmosphere Calculator [online]. [Cit. 24. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.digitaldutch.com/atmoscalc/>
- [25] LPM, 2021. Kostra cívky z plastu [online]. [Cit. 3. 4. 2021]. Dostupné z:
<https://www.lpm.cz/cs/kostra-civky-z-plastu>
- [26] SVS FEM, 2021. ANSYS Maxwell [online]. [Cit. 12. 4. 2021]. Dostupné z:
<https://www.svsfem.cz/produkty/elektronika/ansys-maxwell>
- [27] CAD.cz, 2021. Elektromagnetismus a multidisciplinární analýzy [online]. [Cit. 12. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2961-elektromagnetismus-a-multidisciplinari-analyzy.html>
- [28] ANSYS, 2021. Ansys Maxwell [online]. [Cit. 12. 4. 2021]. Dostupné z:
<https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
- [29] ŠUMPELOVÁ, Jana. *Magnetostrikční vibrační generátor* [online]. Brno, 2017 [Cit. 26. 2. 2021]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Zdeněk Hadaš. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148988
- [30] TE Connectivity, 2021 [online]. Connectors. 350766-4: MATE-N-LOK Rectangular Power Connectors. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z:
<https://www.te.com/usa-en/product-350766-4.html>
- [31] TE Connectivity, 2021[online]. Connectors. 926882-1: MATE-N-LOK Power

- Contacts. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.te.com/usa-en/product-926882-1.html>
- [32] J.S.T. Mfg. Co., 2021 [online]. *XH CONNECTOR*. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.jst-mfg.com/product/pdf/eng/eXH.pdf>
- [33] MÁŠA, Pavel. *Přechodné děje 1. řádu v časové oblasti* [online]. [Cit. 31. 3. 2021]. Dostupné z: <http://amber.feld.cvut.cz/vyu/eo2/files/lectures/P67.pdf>
- [34] NEUDECKER, Julius. JST XHP-2 Housing. GrabCAD [online]. 2018, 24. 10. 2018 [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/jst-xhp-2-housing-1>
- [35] SELLS, Dean. Terminal Rings, Insulated & Uninsulated. GrabCAD [online]. 2018, 4. 10. 2018 [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/terminal-rings-insulated-uninsulated-1>
- [36] Pixabay.com, 2014. Wave Length Oscillograph [online]. [Cit. 26. 5. 2021] Dostupné z: <https://pixabay.com/vectors/wave-length-oscillograph-304930/>
- [37] ŠPRINGL, Vít. Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty. In: Vývoj.hw.cz [online]. 2004, 19. Srpen 2004 [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [38] Amazon.com, Inc., 2021 [online]. 16X 926882-1 Contact female 0.5-2mm2 Universal MATE-N-LOK tinned crimped TE Conn. Amazon.com, 4. 6. 2020. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/413GHsE%2B16L._AC_SL1024_.jpg
- [39] SOS electronic, 2020 [online]. Sortiment. SXH-001T-P0.6 | JST. SOS electronic, 26. 1. 2020. [Cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: <https://cdn.sos.sk/imagecache/product-detail/66/a8/fc0768a1/sxh-001t-p0-6.jpg>
- [40] Elpro-Energo, 2021 [online]. Tlumivky a reaktory. Praha [Cit. 5. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.elpro-energo.cz/tlumivky-a-reaktory/coil-innovation/>
- [41] Energie kvazistacionárního pole. *Kurz fyziky* [online]. [Cit. 31. 3. 2021]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/4_3
- [42] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika I: [učebnice]*. 3. vyd. České Budějovice: Kopp (firma), 2008. ISBN 978-80-7232-365-4.
- [43] MÍKA, Stanislav, Petr PŘIKRYL a Marek BRANDNER. *Speciální numerické metody: numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice*. Plzeň: Vydavatelský servis, 2006. Texty z aplikované matematiky. ISBN 80-86843-13-0. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~mika/SNM2/SNM2.pdf>
- [44] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR, David TOPOLÁNEK a kol. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-7-provoz.pdf>
- [45] MAYER, Daniel a Josef POLÁK. *Metody řešení elektrických a magnetických polí*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. Typové číslo L25-C3-IV-41f/58273.
- [46] BARTOŠ, Václav a Bohumil SKALA. *Měření na elektrických strojích*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-896-X.
- [47] BERTOTTI, Giorgio, 1988. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE* [online]. 1988. Dostupné z: DOI: 10.1109/20.43994.

-
- [48] FIORILLO, Fausto. *Characterization and Measurement of Magnetic Materials*. Nizozemsko: ELSEVIER Academic Press, 2004. ISBN 9780122572517.
- [49] HRUSKA, Karel, LAKSAR Jan a Jan SOBRA, 2018. The Determination of Iron Core Loss Characteristics of Special Electrical Steel Types. *IEEE* [online]. 2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), 2018, pp. 1-6. [Cit. 26. 3. 2021] Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8624717>