



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

STRUKTUROVANÝ MAGNETICKÝ OBVOD S NÍZKÝMI ZTRÁTAMI VYROBENÝ METODOU 3D KOVOVÉHO TISKU

STRUCTURED MAGNETIC CIRCUIT WITH LOW LOSSES MANUFACTURED BY 3D METAL PRINTING
METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Rosecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Michal Kubík, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Vojtěch Rosecký**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Michal Kubík, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Strukturovaný magnetický obvod s nízkými ztrátami vyrobený metodou 3D kovového tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie 3D kovového tisku se začíná prosazovat také v oblasti elektrických strojů jako elektromotory, aktuátory či transformátory a to především při konstrukci jejich magnetických obvodů. Vhodnou konstrukcí a volbou materiálu lze za pomoci 3D tisku dosáhnout zvýšení energetické účinnosti, snížení hmotnosti, zvýšení měrného výkonu či výraznému zlepšení chlazení. Velice slibná se jeví metoda strukturovaného magnetického obvodu, kterou má Odbor TD patentovanou (EP 3373311). V rámci této práce bude přikročeno ke konstrukci magnetického obvodu ve tvaru toroidu právě za použití strukturovaného magnetického obvodu.

Typ práce: vývojová – konstrukční
Výstup práce: publikační výsledek (J, D)
Projekt: GAČR

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je popsat vliv strukturovaného magnetického obvodu vyrobeného technologií 3D kovového tisku na velikost ztrát způsobených vířivými proudy.

Dílčí cíle diplomové práce:

- sestavení magnetického modelu umožňující vypočítat ztráty vířivými proudy,
- stanovení vlivu geometrie struktury, excitační frekvence, velikosti magnetické indukce a materiálu na ztráty,
- návrh geometrie struktury a její aplikace na magnetický obvod ve tvaru toroidu,
- výroba vzorku a experimentální stanovení ztrát.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

GOODALL, Alexander D.; YIANNAKOU, Georgios; CHECHIK, Lova; MITCHELL, Ria L.; JEWELL, Geraint W et al. Geometrical control of eddy currents in additively manufactured Fe-Si. Online. Materials & Design. 2023, vol. 230, s. 112002. ISSN 0264-1275.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem strukturovaného magnetického obvodu vyráběného technologií PBF-LB za účelem omezení ztrát vířivými proudy. Součástí práce je rovněž popis vlivu geometrických a provozních parametrů na výsledné vlastnosti obvodu, vytvoření metodiky návrhu struktur pro aditivně vyráběné magnetické obvody.

Řešení problému vychází z numerických simulací magnetického pole a z návrhu vlastní metody elementů umožňující systematické porovnávání jednotlivých struktur. Celkem byly testovány dva koncepty geometrie elementů, čtverec a šestiúhelník. Posuzován byl zejména vliv jejich velikosti, způsob propojení, vliv izolace a frekvence na vířivé ztráty a průměrnou magnetickou indukci. Na základě získaných výsledků byly identifikovány výhodné geometrické struktury vykazující nízké vířivé ztráty při zachování požadované magnetické indukce. Byly stanoveny závislosti mezi velikostí struktury, frekvencí a efektivitou magnetického obvodu. Vybrané struktury byly aplikovány na toroidní jádro, optimalizovány pro tisk a otestovány. Také byly vytištěny předběžné vzorky toroidů z FeCo prášku, které byly dále testovány před a po tepelném zpracování.

Přínosem práce je systematický přístup k návrhu struktur magnetických obvodů pro aditivní výrobu a vytvoření metodiky umožňující efektivní vyhodnocení struktur z hlediska elektromagnetických vlastností. Získané poznatky mohou být využity při návrhu elektrických zařízení s vysokými nároky na účinnost.

KLÍČOVÁ SLOVA

strukturovaný obvod, vířivé ztráty, FeCo, PBF-LB

ABSTRACT

This master's thesis focuses on the design of a structured magnetic circuit manufactured using PBF-LB technology in order to reduce eddy current losses. The thesis also describes the influence of geometric and operating parameters on the resulting properties of the magnetic circuit and develops a methodology for designing structures for additively manufactured magnetic circuits.

The solution is based on numerical simulations of the magnetic field and on the development of a custom element-based method enabling systematic comparison of individual structures. Two geometric element concepts were tested: square and hexagonal structures. The study evaluates the influence of element size, connection method, insulation, and frequency on eddy current losses and average magnetic induction.

Based on the obtained results, advantageous geometric structures exhibiting low eddy current losses while maintaining the required magnetic induction were identified. Relationships between structure size, frequency, and magnetic circuit efficiency were determined. Selected structures were applied to a toroidal core, optimized for printing, and experimentally tested. Preliminary toroidal samples made of FeCo powder were also printed and tested before and after heat treatment.

The main contribution of the thesis lies in a systematic approach to the design of magnetic circuit structures for additive manufacturing and in the development of a methodology enabling efficient evaluation of structures from the perspective of electromagnetic properties. The acquired findings may be applied in the design of electrical devices with high demands on efficiency.

KEYWORDS

structured magnetic circuit, eddy current loss, FeCo, PBF-LB

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROSECKÝ, Vojtěch. *Strukturovaný magnetický obvod s nízkými ztrátami vyrobený metodou 3D kovového tisku*. Brno, 2026, 87 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Michal Kubík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Michala Kubíka, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1	Magnetické obvody	17
2.1.1	Ztráty v magnetických obvodech	17
2.1.2	Materiály	19
2.2	3D kovový tisk magnetických obvodů	20
2.2.1	Struktura magnetických obvodů	20
2.2.2	Struktury typu Space Filling Curves	21
2.2.3	Aplikace a tisk struktur	23
2.2.4	Mikrotrhlíny jako způsob omezení ztrát	26
2.3	Identifikace novosti a příležitosti	27
3	CÍL PRÁCE	28
3.1	Vymezení problému	28
3.2	Cíle vývoje	30
4	KONCEPČNÍ NÁVRH	31
4.1	Úvodní úvaha	32
4.2	Parametry návrhu	32
4.3	Technologická omezení	33
4.4	Numerický model	33
4.5	Metoda elementů	35
4.6	Ověření numerického modelu	35
4.7	Výběr geometrie elementů a ověření metody	36
4.8	Způsob vyhodnocení struktur	37
4.9	Aplikace struktur	38
4.10	Experiment a ověření experimentu	38
4.11	Seznam omezení a zjednodušení metody	39
4.12	Seznam předpokládaných výstupů	39
4.13	Využití jazykového modelu	39
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	40

5.1	Tvorba a ověření numerického modelu	40
5.1.1	Numerický model	40
5.1.2	Ověření numerického modelu	43
5.1.3	Ověření metody elementů	44
5.2	Experiment	45
5.2.1	Měřicí řetězec	45
5.2.2	Výpočtový model	46
5.2.3	Ověření experimentu	47
5.2.4	Aditivní výroba a tepelné zpracování	48
5.2.5	Výsledky	50
5.3	Výběr struktury	56
5.4	Tvar výsledných polí	58
5.5	Vliv parametrů	61
5.5.1	Vliv frekvence	61
5.5.2	Vliv velikosti	63
5.5.3	Vliv tvaru a propojení	64
5.5.4	Vliv izolace	65
5.5.5	Vliv materiálu	66
5.5.6	Vliv vodivosti	67
5.5.7	Vliv magnetické indukce a intenzity	68
6	DETAILNÍ NÁVRH	69
6.1	Aplikace struktury	69
6.2	Metodika	73
7	ZÁVĚR	76
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	78
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	80
9.1	Příklady použitých zkratk	80
9.2	Příklady použitých fyzikálních veličin	81
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	82
11	SEZNAM TABULEK	86
12	SEZNAM PŘÍLOH	87

1 ÚVOD

Magnetický obvod je důležitou částí různých zařízení, jako jsou elektromotory nebo transformátory, které jsou dále využívány pro průmyslová či energetická řešení. Jejich efektivita tedy ovlivňuje celkovou efektivitu finálních produktů a systémů.

V magnetických obvodech mají velmi často významný podíl ztráty vířivými proudy. Pro jejich omezení se v současnosti obvody segmentují pomocí tenkých plechů, lamel, které jsou navzájem odizolovány. Výroba probíhá válcováním ze speciálně vyvinutých magneticky měkkých materiálů, které pak mají vliv na konečné vlastnosti obvodu.

V současnosti se začíná uvažovat o využití aditivních technologií pro tvorbu strukturovaných obvodů. Důvodem je možnost řídit geometrii, potažmo vlastnosti, lokálně, což konvenční technologie zpravidla neumožňují. Technologie PBF-LB značně rozšiřuje škálu vyrobitelných struktur a je proto otázkou, jaká z nich je pro magnetické obvody optimální. Vědecké kolektivy numericky i experimentálně testovaly různé tvary, zejména pak Hilbertovu strukturu [1; 2; 3; 4; 5], která podle zmíněných článků vykazuje dobré vlastnosti, laminaci [3; 4; 1] a šestiúhelníkový vzor [5] nebo mikrotrhlíny [6]. Proběhl i pokus o analytické řešení [1] a dokonce byly vytištěny i první funkční vzorky statorového jádra [7; 8].

Zatím však nebyl nalezen ani článek s postupem návrhu struktury ani s popisem vlivu parametrů návrhu na efektivitu daného obvodu. Lze tedy předpokládat, že jejich návrh nebyl systematický, respektive nevycházel z teoreticky nejvýhodnější struktury, a jejich dopad je proto omezený.

Proto je cílem této diplomové práce nejen vyvinout strukturu pro aditivně vyráběný magnetický obvod ve tvaru toroidu za účelem omezení vířivých ztrát v magnetickém obvodu, ale také popsat vlivy konstrukčních a provozních parametrů na ztráty, vytvořit metodiku návrhu a navrhnout teoreticky nejvýhodnější strukturu, která bude aplikována na toroidní jádro. Většina práce je založena na numerických simulacích, ale jsou i vyrobeny předběžné vzorky tištěných toroidů pomocí PBF-LB z FeCo prášku.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V makrosvětě lze elektromagnetické pole i přes úzkou provázanost vnímat jako elektrické a magnetické pole. Zdrojem elektrického pole je elektricky nabitá částice. Zdrojem magnetického je dipól nebo pohybující se nabitá částice. Oba zdroje popisuje intenzita a samotné pole pak indukce. Mezi elektřinou a magnetismem platí obrácená analogie: Elektrická síla se počítá z intenzity elektrického pole, ale magnetická síla se počítá z magnetické indukce, nikoliv z intenzity magnetického pole. Je tomu tak proto, že u elektrického pole prostředí reaguje na pole, zatímco magnetické pole reaguje na prostředí.

To, že jsou obě pole provázána, dokládá i jev indukce. Podobně jako pohybující se nabitá částice indukovala magnetické pole, tak nestacionární magnetické pole může indukovat elektrický proud, který má takovou orientaci, aby sekundární indukované magnetické mělo opačnou orientaci než pole primární.

Velký vliv na elektromagnetické pole má prostředí. Veličinami popisující vlastnosti prostředí jsou tyto: vztah prostředí vůči elektrickému poli (permitivita), vztah prostředí vůči magnetickému poli (permeabilita) a schopnost prostředí vést elektrický proud (vodivost). Dle vodivosti jsou materiály kategorizovány na **vodiče, polovodiče a izolanty**. Dle hodnoty permeability dělíme materiály na: **Diamagnetické**, které v magnetickém poli vytvářejí magnetický dipól s opačnou orientací, než má vnější magnetické pole, čímž zeslabují pole, **paramagnetické**, které naopak vytvářejí dipól se shodnou orientací a zesilují pole, a **feromagnetické**, které magnetické pole zesilují výrazně. Feromagnetické látky jsou buď magneticky tvrdé, tzn. že mají stálé magnetické pole, nebo magneticky měkké, které se magnetizují, nacházejí-li se v magnetickém poli.

Magnetické i elektrické vlastnosti látek nejsou stále stejné, ale mění se zejména např. v závislosti na teplotě. U velmi nízkých teplot blížících se 0 K dochází u konkrétních materiálů k supravodivosti. S rostoucí teplotou naopak často klesá permeabilita, proto je nutné obvody chladit.

2.1 Magnetické obvody

V technickém světě existuje mnoho různých zařízení jako transformátory, elektromotory, generátory, antény, nebo různé měřicí systémy, které pracují s magnetickým polem. Aby tato zařízení správně fungovala, musí mít vhodně navržené magnetické obvody, které usměrňují magnetický indukční tok a omezují ztráty v obvodu. Magnetické obvody se dle frekvence dělí na nízkofrekvenční (0 až 10 kHz), středofrekvenční (10 kHz až 100 kHz), a vysokofrekvenční (nad 100 kHz), které mohou pracovat i s frekvencemi řádově GHz. Magnetické obvody lze dále dělit dle uzavřenosti, dle druhu magnetizace a rozložení indukčního toku. Většina obvodů se vyrábí konvenčně, ale probíhají i experimenty s aditivně vyráběnými.

Tato práce je zaměřena na nízkofrekvenční oblast a na ztráty s ní související. Níže jsou jednotlivé ztráty rozebrány.

2.1.1 Ztráty v magnetických obvodech

Magnetické ztráty se skládají ze tří složek: Hysterezní ztráty, vířivé ztráty a dodatečné ztráty.

$$P_{tot} = P_h + P_e + P_{add}$$

P_h Hysterezní ztráty

P_e Ztráty vířivými proudy

P_{add} Dodatečné/přídavné ztráty

Jednotlivé složky ztrát jsou závislé na frekvenci magnetického pole, přičemž **největší vliv mají vířivé ztráty** ($\sim f^2$) a hysterezní ztráty ($\sim f$). Nejmenší podíl ztrát zaujímají dodatečné ztráty. Ztráty se uvádějí buď ve W/tech, nebo často jako měrné ztráty ve W/kg, popřípadě W/m³. Níže jsou všechny tři složky ztrát detailně charakterizovány.

Hysterezní ztráty

Princip hysterezních ztrát tkví v energii, která se ztratila při cyklickém magnetování. Samotné magnetování popisuje B-H smyčka a plocha této smyčky pak popisuje ztráty. V materiálu při magnetování postupně roste magnetická indukce až do saturace. Přestane-li pole působit, zůstane v materiálu zbytková magnetická indukce (remanence). Aby byla indukce nulová, musí vnější pole působit na materiál v opačném směru, tato hodnota se nazývá koercivita. V podstatě se indukce zpožďuje za intenzitou magnetického pole.

Mezi faktory, které mohou ovlivnit hysterezní ztráty jsou: materiál a jeho kvalita, frekvence, magnetická indukce, velikost a orientace zrn i textury.

Ztráty se počítají z rovnice:

$$P_h = fV \oint H dB$$

Pro praxi se ale spíše užívá Steinmetzova rovnice $P_v = kf^a B^b$, přičemž její tvar pro hysterezní ztráty je: $P_h = K_h f B_{max}^n$.

V [m ³]	objem
f [Hz]	frekvence
k, a, b [-]	Steinmetzovy koeficienty, reprezentující materiálové vlastnosti
H [A/m]	intenzita magnetického pole
B [T]	magnetická indukce
B _{max} [T]	špičková magnetická indukce
K _h [-]	koeficient hysterezních ztrát
n [-]	Steinmetzův exponent (nejčastěji 1,5 až 2,5)

Ztráty vířivými proudy

Elektrické a magnetické pole jsou silně provázány, proto se indukují vlivem nestacionárního magnetického pole uvnitř magneticky měkkého materiálu smyčky elektrického proudu. Tyto proudy se nazývají vzhledem k svému charakteru vířivé, nebo také Foucaultovy proudy. Jelikož se jedná o elektrický proud, lze na něj aplikovat Ohmův zákon: $P = U/R^2$. Z něj je patrné, že pro omezení ztrát je zapotřebí maximalizovat odpor materiálu.

Výpočet ztrát vířivými proudy lze uskutečnit opět podle Steinmetzovy rovnice:

$$P_e = K_e f^2 B_{max}^2$$

Analyticky lze vypočítat ztráty v nekonečné lamelle pomocí následujícího vzorce:

$$P_e = \frac{\pi^2 B_{max}^2 d^2 f^2}{6\rho}$$

Vzhledem k omezeným podmínkám v realitě, bývá vzorec upraven tak, aby vyhovoval pro obdélníkový průřez.

$$P_e = \frac{\pi^2 B_{max}^2 a^2 b^2 f^2}{(a^2 + b^2)6\rho}$$

P _e [W/m ³]	vířivé ztráty
f [Hz]	frekvence
B _{max} [T]	špičková magnetická indukce
K _e [-]	koeficient vířivých ztrát
d, a, b [m]	rozměry tvaru
ρ [Ω/m]	měrný elektrický odpor

V souvislosti s vířivými proudy není možné opomenout **skinefekt**. Skinefekt je jev, kdy se vířivé proudy soustřeďují k povrchu materiálu. Vzhledem k exponenciálnímu poklesu proudové hustoty směrem od okraje byla stanovena hloubka vniku. Dále už je proudová hustota blízká nule.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

δ [mm].....	hloubka vniku
ω [rad/s].....	úhlová frekvence
μ [H/m].....	permeabilita
σ [S/m]	vodivost

Skin efekt se nejen podílí na omezení elektrických ztrát, ale také bohužel omezuje hodnotu magnetické indukce uvnitř materiálu. Stejně jako ztráty je hloubka vniku frekvenčně závislá. V praxi jsou obvody převážně nízkofrekvenční, přesto i zde může být skin efekt patrný. Vířivé ztráty se potlačují použitím vhodných materiálů a strukturováním jádra elektrických zařízení např. pomocí navzájem odizolovaných tenkých plechů.

Pro obecné popsání chování a pro řešení numerických simulací se užívá difuzní rovnice, která vznikne kombinací Faradayova, Ampérova a Ohmova zákona.

Dodatečné ztráty

Hysterezní a vířivé ztráty tvoří majoritní podíl ztrát uvnitř jádra, ale tyto ztráty nejsou kompletní. Proto se do rovnice pro výpočet ztrát přidávají tzv. dodatečné neboli přídavné ztráty. Tyto ztráty zahrnují ostatní vlivy. Mezi ně patří ztráty magnetostrickí, což jsou ztráty způsobené změnou rozměrů vlivem působení magnetického pole. Tento jev je doprovázen příznačným zvukem. Dále dodatečné ztráty zahrnují lokální anizotropní chování, nebo nepřesnosti z výroby. Tyto ztráty lze zjistit odečtením hysterezních a vířivých ztrát od celkových ztrát v obvodu.

2.1.2 Materiály

Pro magnetické obvody se používají **magneticky měkké materiály**. Ty zajistí potřebné mechanické a magnetické vlastnosti. Na příkladu transformátoru je význam těchto materiálů zřejmý. Jádro transformátoru je tvořeno magneticky měkkým materiálem, který účinně distribuuje magnetické pole generované primárním vinutím na sekundární vinutí, přičemž jeho magnetické pole se mění v závislosti na primárním vinutí.

Vhodnost jednotlivých materiálů je **posuzována z hlediska schopnosti omezení ztrát, permeability, rezistivity a magnetické saturace**, apod. Nezanedbatelným parametrem je cena materiálu, mechanické vlastnosti a vhodnost pro zvolenou technologii zpracování (laminace, aditivní výroba)

Pro výrobu magnetických obvodů lze použít: křemíkové oceli, permalloy, měkké ferity, amorfní železo-niklové slitiny, nanokrystalické slitiny, železo-kobaltové slitiny, HEA. Pro výrazné omezení vířivých a hysterezních ztrát je v určitých případech možné použít i SMC (Soft Magnetic Composites).

Při výrobě pak důležitou roli zastává mikrostruktura, textura a krystalová mřížka materiálu, které mají zásadní vliv na finální magnetické a elektrické vlastnosti.

2.2 3D kovový tisk magnetických obvodů

Aditivní výroba je jednou z oblastí výroby, která je v současné době pod drobnohledem vědeckých pracovišť i výrobních podniků. Limity 3D tisku se posouvají a hledá se uplatnění nových technologií. Jednou z oblastí je i kovový 3D tisk magnetických obvodů. K tisku z kovu lze použít různých technologií. Nejvýznamější technologií je PBF. Kromě PBF jsou i možnosti využít Material Extrusion, Binder Jetting, Material Jetting, nebo Direct Energy Deposition. PBF je způsob výroby spočívající v postupném nanášení tenkých vrstev velmi jemného kovového prášku, který je nejčastěji taven laserem (PBF-LB), nebo elektronovým paprskem (PBF-EB) v místě budoucí součásti.

Samotný tisk PBF-LB probíhá uvnitř komory s inertní atmosférou. Tisknutelných materiálů je poměrně mnoho, ale zatím z nich bývá pro tisk volen pouze jeden. Základní parametry, které lze nastavovat, jsou rychlost a strategie skenování, tloušťka tisknuté vrstvy a hatch distance.

Zásadní výhodou je především tisknutelnost tvarů obtížně dosažitelných konvenčními technologiemi a možnost ovlivňovat materiálové vlastnosti nastavením parametrů. Oproti tomu je zde řada nevýhod. Především je zde nutný postprocesing (odřezání a tepelné zpracování), dále je zde relativně nižší přesnost (hrubý povrch a minimální tisknutelný rozměr). Může se objevovat i vyšší porozita a častá je nutnost podpor. Samotný tisk včetně přípravy je časově náročný.

2.2.1 Struktura magnetických obvodů

V předchozích kapitolách byla nastíněna fyzika, která se za magnetickými obvody skrývá. Bylo ukázáno, že vlastnosti magnetického obvodu závisí na mnoha parametrech. Dalšími parametry jsou tvar obvodu a jeho struktura.

Vířivé proudy **způsobují nezanedbatelné ztráty** a pro jejich omezení je nezbytné danou součást (daný obvod) vhodně strukturovat, tak aby stále plnila funkci, ale vířivé proudy byly omezeny. Princip omezení proudu spočívá v prodloužení celkové délky proudových smyček vhodným tvarováním obvodu, čímž dochází ke zvýšení elektrického odporu.

V kontextu práce se magnetickými obvody rozumí magneticky měkké části elektrických zařízení jako jsou elektromotory a transformátory, v nichž vířivé ztráty mají nezanedbatelný vliv, a proto se často vyrábí ze vzájemně odizolovaných plechů. Aditivní výroba však umožňuje tisknout nové tvary a tvořit struktury, které by konvenčně nebyly vyrobitelné.

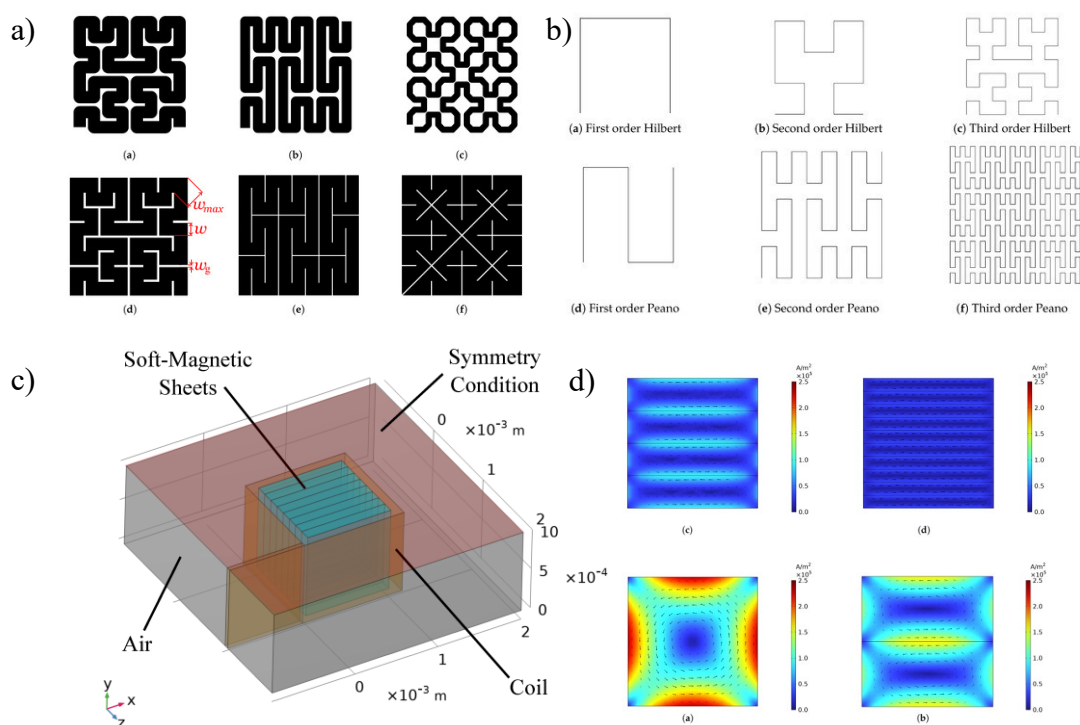
Samotný návrh struktury spočívá v rozdělení plochy kolmé na magnetický tok pomocí izolace. Způsobů, jak pravidelně rozdělit 2D plochu, je mnoho, čehož dokladem je obyčejné dláždění veřejných prostranství či interiérů budov. Příkladem uměleckých děl s tematikou rozličnosti geometrických struktur jsou jednoznačně i díla Mauritse Cornelise Eschera. Nástroje pro popis struktur a tvarů lze nalézt v matematice v teorii dlaždic a v diferenciální geometrii.

2.2.2 Struktury typu Space Filling Curves

Space Filling Curves, zejména však Hilbertova struktura, se staly předmětem výzkumu různých vědeckých týmů. Tyto týmy zkouší SFC testovat a dále pak tisknout a porovnávat s jinými strukturami. Mr. Carsten Klein s kolektivem otestovali sadu SFC křivek a porovnali ji numericky s laminací z hlediska ztrát a vyplnění prostoru. Příklad křivek a jejich optimalizace pro tisk je na obr. 1a, na obrázku 1b pak je viditelné pravidlo pro tvorbu Hilbertovy a Peanovy struktury do 3. řádu.

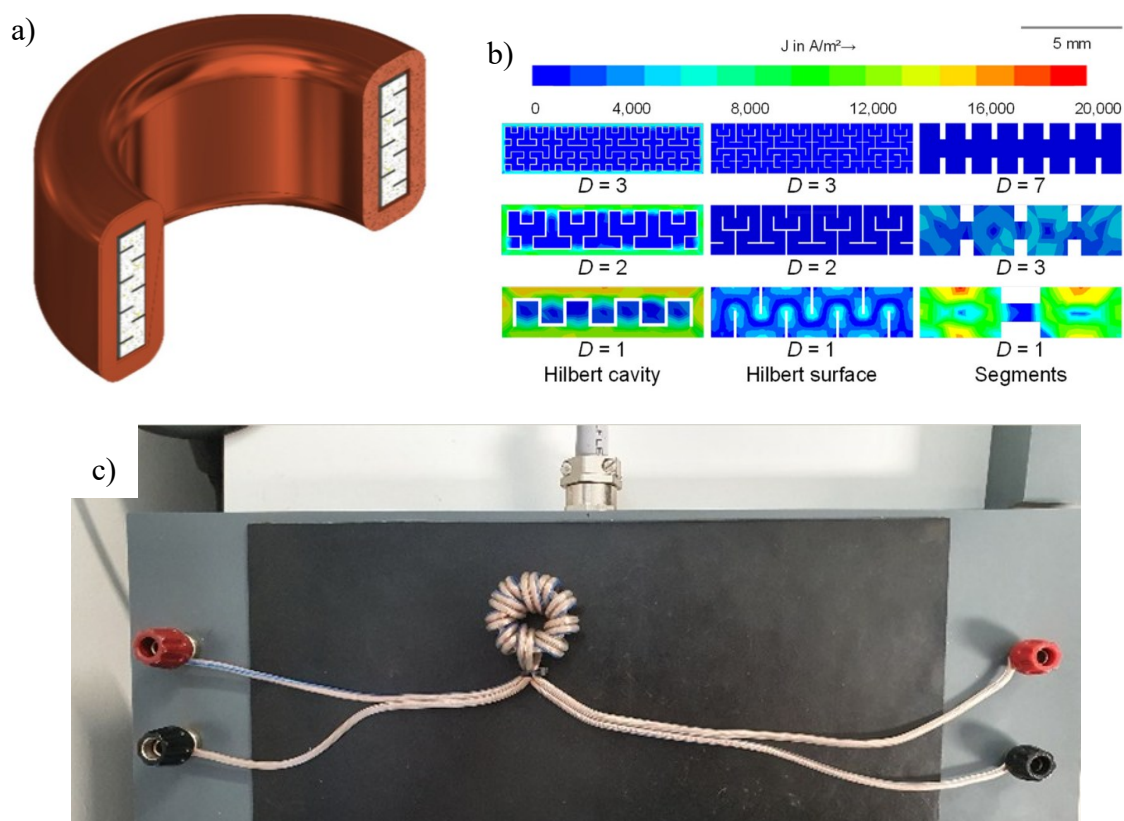
Bylo zjištěno, že lamela o tloušťce odpovídající tloušťce SFC mají sice až o 27 % nižší ztráty vířivými proudy, ale zároveň mají nižší fill faktor. Při návrhu konkrétního obvodu je tedy třeba vzít toto v potaz.

Řešení bylo provedeno v COMSOL Multiphysics a analyticky. Numerický řešič sestával z části jádra toroidu ovinutého cívkou (obr. 1c). Dále byly aplikovány okrajové podmínky. Výsledky byly mj. zjištěny pro lamely o různých tloušťkách viz obr. 1d. [1]



Obrázek 1 a) příklad SFC křivek b) tři úrovně Hilbertovy a peanovy křivky c) numerický model d) ukázka výsledků simulací

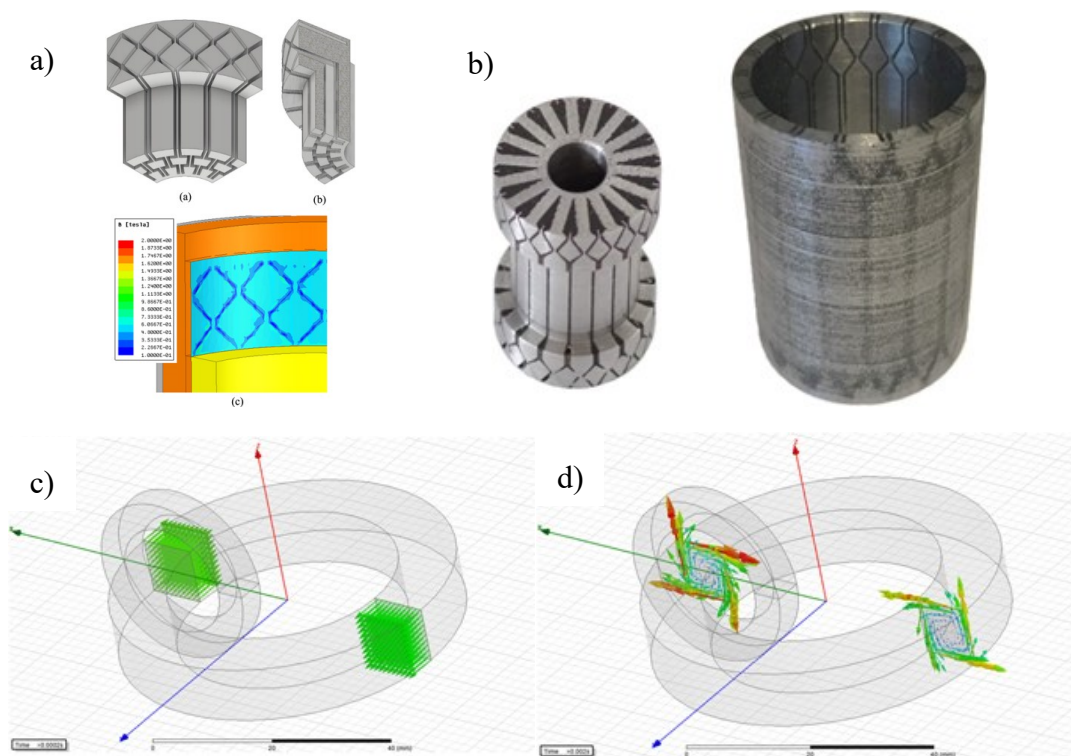
Kolektiv autorů v čele s Nikolasem Urbanem zkoumal rovněž různé struktury, tyto struktury nebyly hodnoceny analyticky, ale výsledkem byl experimentální toroid (obr. 2c). Materiál pro výrobu byl použit FeSi6.5. Pro experiment byla na toroid navinuta budící cívka spolu s cívkou měřicí odezvu. Numerické simulace probíhaly v Ansys Electronics 2020, přičemž geometricky se model od předchozího zásadně neliší, podstata je stejná, pouze není použit průřez toroidu, ale celý toroid (obr. 2a). Testovány byly tři různé křivky ve třech velikostech (obr. 2b). [2]



Obrázek 2 a) Numerický model b) Testované křivky c) Testování toroidního jádra

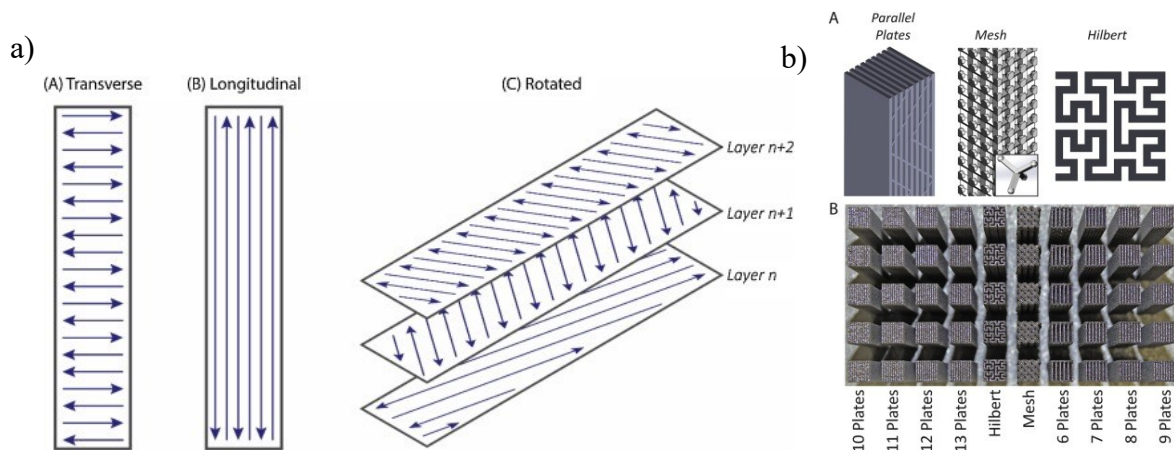
2.2.3 Aplikace a tisk struktur

Úplně jiný účel primárně sledoval kolektiv autorů z ÚK FSI VUT v Brně. Jejich články zabývající se vyvinutím magnetoreologického tlumiče s minimální reakční dobou jsou jedny z prvních, které navrhuji k účelu snížení ztrát vířivými proudy využít 3D tisk. Kromě numerických simulací v Ansys Electronics 17.1. byl tlumič i úspěšně otestován. Na obr. 3c jsou zobrazeny vektory magnetické indukce, na obr. 3d pak vektory proudové hustoty. Použitá struktura viz obr. 3a. Materiál tlumiče byl zvolen $>99.8\%$ Fe z důvodu dobré tisknutelnosti. V článcích není přímo popsáno, proč byla zvolena zrovna tato struktura a nikoliv jiná. V článkách od jiných autorů se nevyskytuje. Do budoucna je cílem kolektivu z VUT použít vhodnější materiály jako železo-kobaltové nebo železo-křemíkové prášky. Vytisknutý obvod viz obr. 3b [9; 10]



Obrázek 3 a) model struktury, b) vytisknutý strukturovaný obvod c) numerický model - magnetická indukce, d) numerický model – proudová hustota

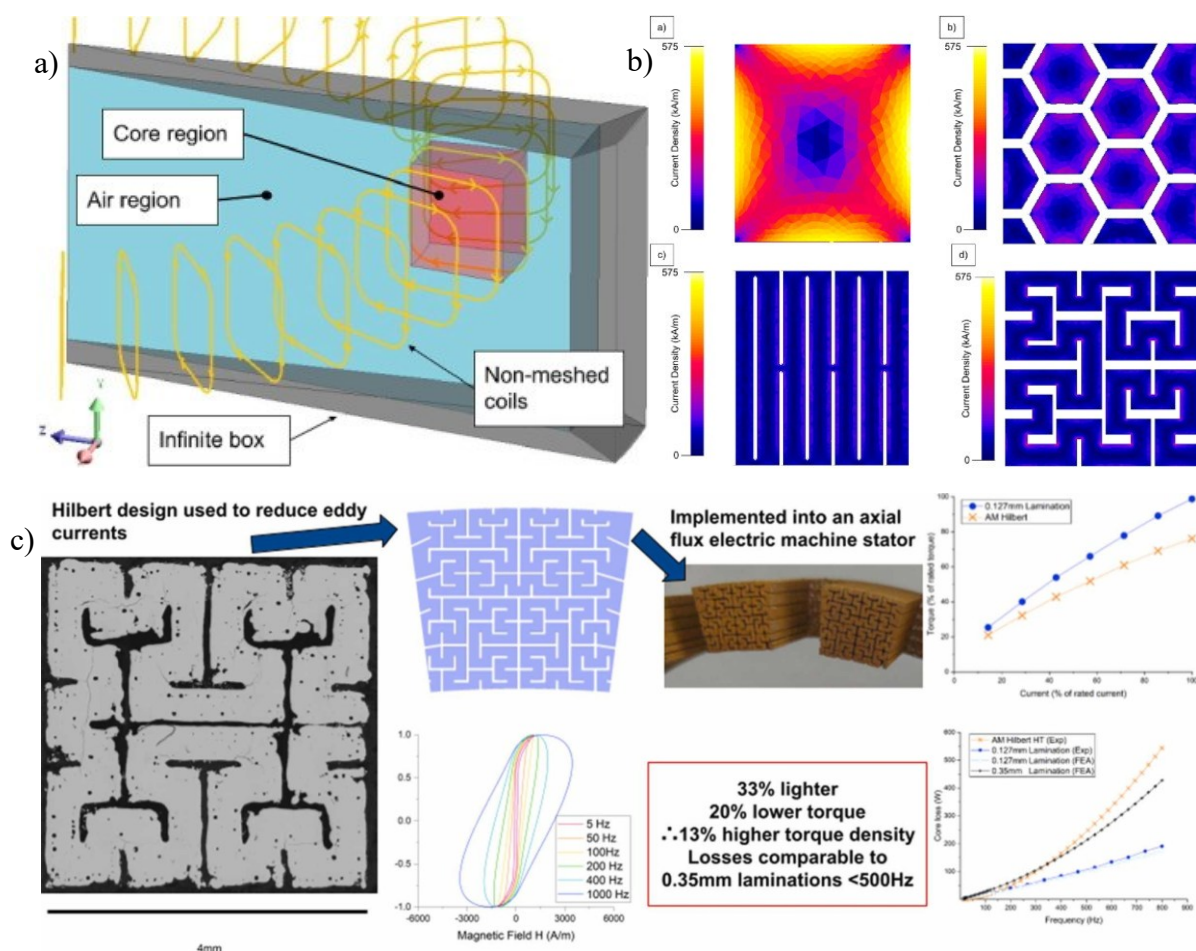
A. Plotkowski a kolektiv testovali tři skenovací vzory metodou single-scan a double-scan, které se navzájem liší počtem vytavování jedné vrstvy prášku (obr. 4a). Pro numerické simulace byl užit program COMSOL, modul AC/DC. Proveden byl rovněž experiment, kdy byly testovány vzorky strukturované do lamel o různých šířkách, dále mřížková struktura a zvláště pak byla otestována Hilbertova struktura, která vykazovala dobré výsledky (obr. 4b). Pro testování vzorků bylo použito Epsteinova rámu. [4; 3]



Obrázek 4 a) strategie skenování b) vytištěné vzorky struktur

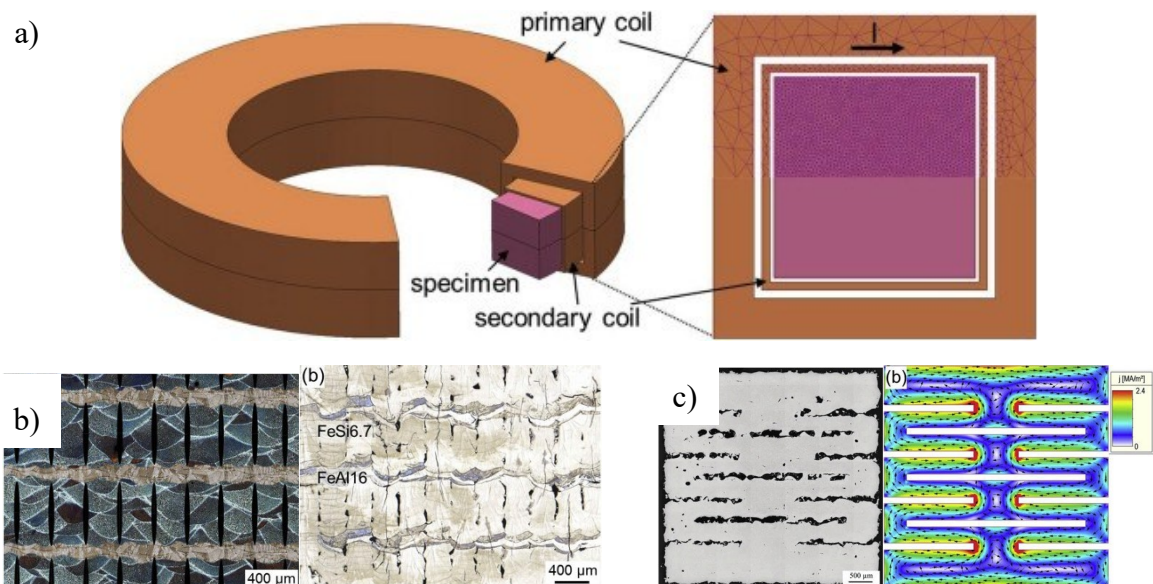
Kolem roku 2023 vydal kolektiv autorů v čele s Alexanderem D. Goodallem a FNU Nishanthem tři články věnující se problematice tisku elektrických zařízení. První článek demonstruje schopnost vyrobit kvalitní vzorky pomocí PBF-LB a zároveň jsou zde pomocí simulací v programu Altair Flux porovnány různé struktury (obr. 5a, b). Velice výhodnou se ukázala být šestiúhelníková, která překonala jiné včetně Hilbertovy struktury. Numerický model je opět podobný s jinými vědeckými kolektivy. Problém, na nějž narazili, se týkal možnosti zkratu, který simulace neuvažují. Vznikají tak mnohem vyšší ztráty. Řešením je zvětšení mezery mezi tisknutými bloky, vedoucí k výraznému snížení ztrát. Vliv na ztráty má i kvalita povrchu tisknuté struktury. Kvalita by měla být taková, aby i přes nerovnosti zůstala mezera mezi bloky dostatečná. Testovány byly mezery 0,1 a 0,2 mm. [5]

Další dva články se už věnují tisku axiálního elektromotoru. Konkrétně byl vytisknut stator z materiálu Fe-6,5Si. V porovnání s obdobným konvenčním modelem je tisknutý model o 30% lehčí, ale má o 18% menší magnetický tok a o 22% nižší max. krouticí moment (obr. 5c). [8; 7]



Obrázek 5 a) model pro numerickou simulaci b) Výsledek testování struktur c) grafický abstrakt shrnující článek [7].

Poslední článek nevyužívá k omezení vířivých proudů struktury geometrické, ale spíše se zabývá strategiemi omezení vířivých proudů. Simulace byly opět provedeny na toroidním jádře, tentokrát v softwaru MagNet from Mentor Graphics (former Infolytica) a byly vyrobeny i vzorky reprezentující jednotlivé strategie (obr. 6a, c). Celkem byly formulovány 3 strategie vedoucí ke snížení vířivých proudů, které lze navzájem kombinovat. 1. strategie je zaměřena na parametry tisku a mikrostrukturu, 2. strategie popisuje pozitivní vliv štěrbin na pokles ztrát, 3. strategie kombinuje vrstvy z různých materiálů, zde konkrétně Fe a FeAl16 (obr. 6b). [11]

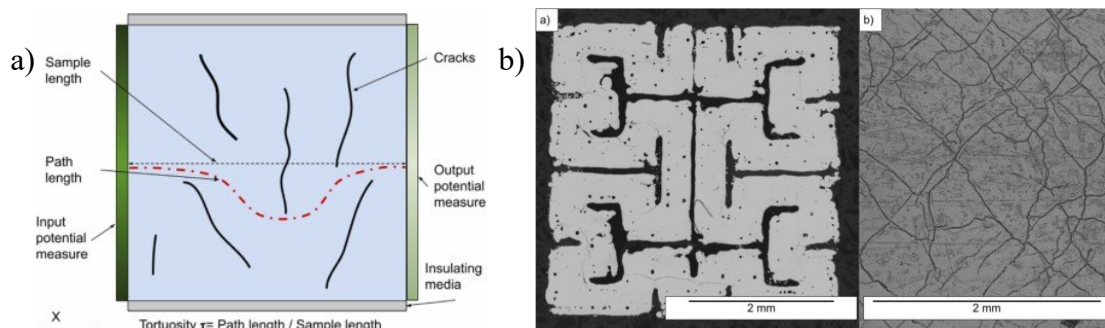


Obrázek 6 a) numerický model b) porovnání modelu a reálné struktury c) Vytisknutý vzorek a výsledek numerické simulace

2.2.4 Mikrotrhliny jako způsob omezení ztrát

A. D. Goodall s kolektivem přispěli kromě již zmíněnými články i dalším článkem z roku 2023, kde testují vliv mikrotrhlin na snížení ztrát vířivými proudy (obr. 7). Byly zkoušeny různé strategie tisku u materiálu Fe-6.5 hm.%Si. Pomocí změny strategie tisku je možné ovlivňovat orientaci trhlin. Snížení rychlosti skenování vede ke zvýšení hustoty trhlin v materiálu. Vzorek 8_400_SR (strategie pruhů s rotací, rychlost 400 mm/s) vykázal efektivní elektrický odpor až $206 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, což odpovídá 250 % objemového odporu. Kromě toho vzorek s mikrotrhlinami vykazoval > 97 % fill faktor oproti Hilbertově struktuře s 85.5%. Celkové ztráty střídavého pole při 50 Hz a 1 T dosáhly 2,2 W/kg, což je méně než u Hilbertovy struktury (6,8 W/kg). [6]

Výsledky tedy naznačují, že by tento způsob tvoření struktury mohl mít potenciál pro aditivně vyráběné magnetické obvody.



Obrázek 7 a) Princip omezení proudu v materiálu b) Detail porovnávaných struktur - Hilbertova křivka a mikrotrhliny

2.3 Identifikace novosti a příležitosti

Magnetické obvody tvoří základ pro správnou činnost elektromagnetických zařízení jako jsou transformátory a elektromotory. Jejich efektivita je úzce spjata s omezením ztrát například pomocí segmentace. S postupujícím vývojem aditivních technologií se začíná uvažovat o uplatnění této technologie v oblasti magnetických obvodů.

Aditivní výroba strukturovaných magnetických obvodů představuje nový přístup k návrhu a realizaci elektromagnetických systémů. Umožňuje na rozdíl od konvenčních postupů výrobu geometricky složitých struktur s řízenou vnitřní architekturou a lokálními vlastnostmi. To pak vede k efektivnější distribuci magnetického toku a ke snížení ztrát. Zároveň to otevírá prostor pro topologickou optimalizaci obvodů.

Z hlediska praktického uplatnění lze očekávat využití zejména v letectví, kde jsou kladeny vysoké nároky na výkon, nízkou hmotnost a kompaktnost zařízení, takže časová náročnost tisku a cena nemusí být určující.

I přes uvedené přínosy zůstávají výzvy, zejména v oblasti materiálů, řízení výrobního procesu a predikce výsledných vlastností. Tyto aspekty představují prostor pro další výzkum a vývoj.

3 CÍL PRÁCE

3.1 Vymezení problému

V přehledu současného poznání bylo pojednáno ve stručnosti o problematice ztrát v magnetických obvodech a dále byly vyzdvíženy články zabývající se omezením ztrát v magnetickém obvodu pomocí struktury. V několika případech byly struktury také vytištěny a dokonce byly i porovnány různé strategie tisku.

Optimální magnetický obvod je charakteristický tím, že dosahuje požadované hodnoty **magnetického indukčního toku při minimálních ztrátách**. Pro omezení ztrát v obvodu je klíčové omezit ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty. V porovnání s hysterezními ztrátami ($\sim f, B^1$ až $1,6$) mohou vířivé ztráty ($\sim f^2, B^2$) v závislosti na změně vnějších podmínek rychle narůstat.

Hysterezní ztráty lze omezit volbou vhodného materiálu, zvýšením poměru izolace ku užitému materiálu, snížením frekvence, snížením potřebného H pro získání požadovaného indukčního toku a rovnoměrným rozložením magnetické indukce v obvodu.

Redukovat vířivé ztráty lze volbou vhodného materiálu, zvýšením poměru izolace ku užitému materiálu, volbou vhodné struktury, která umožní rovnoměrné rozložení B a maximalizaci elektrického odporu pomocí prodloužení vodivých drah, aby součet délek všech elektrických smyček byl co největší. Snížit vířivé ztráty lze také zmenšením velikosti struktury, čímž se bohužel sníží i fill faktor.

V článcích byly testovány různé tvary, zejména Hilbertova struktura [1; 2; 3; 4; 5] a laminace [3; 4; 1]. Buď numericky nebo experimentálně. Byl proveden i pokus o analytické řešení [1]. Porovnání numerických a experimentálních výsledků je pouze v článku A. D. Goodalla [5], kdy byly výsledky velmi odlišné. Pro vyhodnocení struktur se obvykle používá buď ztrátový koeficient, nebo ztráty ve W/kg, nebo BH křivka [1; 2; 10; 4; 5; 7; 11; 6]. Numerické simulace užívají obdobného modelu, pouze jsou provedeny v různých softwarech. Dobré výsledky podle zmíněných článků vykazuje Hilbertova struktura [8; 7; 4; 3], laminace [4; 3] a šestiúhelníkový vzor [5], nebo mikrotrhliny [6]. V článcích z VUT není cílem porovnání struktur, ani jejich vývoj. Čtvercová struktura je užita pro omezení vířivých proudů bez bližšího vysvětlení.[9; 10] Hilbertova struktura pak byla dokonce aplikována na aditivně vyrobený stator a v porovnání s konvenčně vyrobeným laminovaným statorem bylo dosaženo zajímavých výsledků, nicméně nelze tato data brát jako jednoznačný důkaz o výhodě aditivní oproti konvenční technologii pro výrobu elektromotorů [7; 8].

Pro PBF-LB tisk obvodů bylo využíváno FeSi prášku, ale nabízí se i jiné materiály určené pro tisk. Zejména železo-kobaltový prášek má velmi dobré materiálové vlastnosti. Izolační mezera pro tisk byla 0,2 mm [5], kolektiv z VUT pak 0,3 mm [9], lépe vyšla strategie double scan [4].

Lze konstatovat, že v žádném z výše uvedených článků není odůvodněno, jak a proč byly struktury a jejich velikost vybrány. Zatím nebyl nalezen ani článek s postupem návrhu struktury a popisem vlivu parametrů návrhu na efektivitu daného obvodu. Vždy se jedná o měření izolovaných jevů, aniž by bylo vycházeno z teoreticky nejefektivnější struktury, proto je jejich dopad omezený. Pokud by se podařilo vytvořit metodiku pro vyhodnocení struktur, nebo definovat požadavky a závislosti mezi parametry návrhu, byl by to silný nástroj pro vytvoření relevantních struktur, a tedy zvýšení kvality výsledků při komparaci.

Diplomová práce proto cílí na vývoj nové struktury, ale k samotnému návrhu přistupuje systematicky. Součástí hlavních výstupů bude tedy kromě finální struktury i metodika.

3.2 Cíle vývoje

Hlavní cíl:

Hlavním cílem je vyvinout strukturu pro aditivně vyráběný magnetický obvod ve tvaru toroidu za účelem omezení vířivých ztrát v magnetickém obvodu. Jelikož v zadání není určeno, pro jaké podmínky má být toroid navržen, byly dále specifikovány konkrétní podmínky:

Obvod zajišťuje zvolený referenční magnetickou indukci $B = 1 \text{ T}$ a cílí na minimalizaci vířivých ztrát ve frekvenčním rozsahu do 300 Hz, což je frekvenční rozsah běžných elektromotorů.

Vyrobeny budou i předběžné vzorky tištěného toroidu pro porovnání se vzorkem vyrobeným konvenční technologií. Materiál předpokládaný pro aditivní výrobu pomocí PBF-LB je FeCo.

Rozměry toroidu s obdélníkovým průřezem jsou pro numerický model zadány: $D_{\max} = 40 \text{ mm}$, $d_{\min} = 34 \text{ mm}$, $(a = 3 \text{ mm})$, $b = 5 \text{ mm}$, zaoblení hran 0,4 mm. Experimentální toroid uvažuje stejné rozměry.

Dílčí cíle:

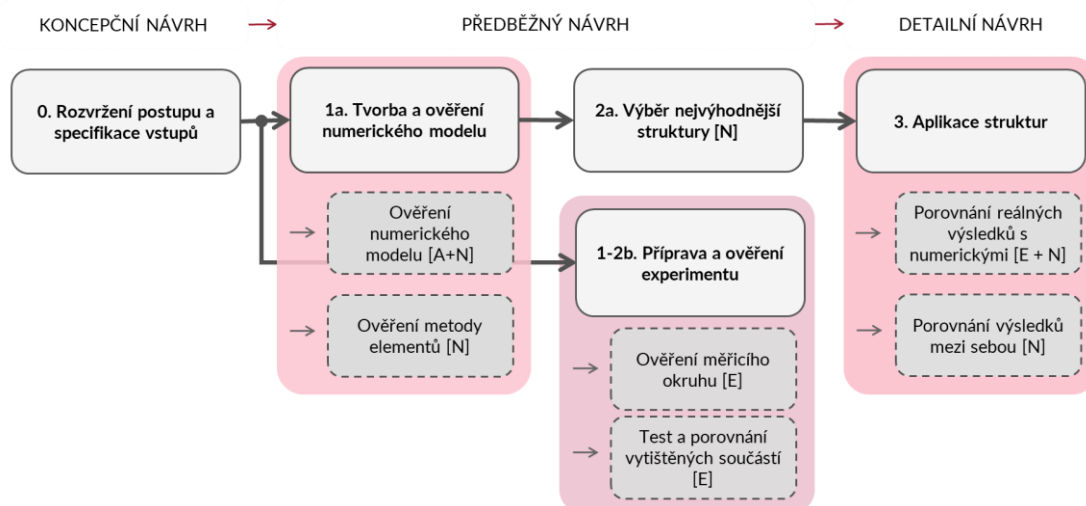
1. Sestavení magnetického modelu umožňující vypočítat ztráty vířivými proudy. - Navíc oproti zadání bude vytvořena metodika návrhu.
2. Stanovení vlivu geometrie struktury, excitační frekvence, velikosti magnetické indukce a materiálu na ztráty. - Získané poznatky a závislosti, včetně již zmíněné metodiky mohou být cenné pro navazující práce. Vliv geometrie zahrnuje vliv tvaru a velikosti. Navíc bude i zaznamenán vliv vodivosti a vliv izolace.
3. Návrh geometrie struktury. - Návrh geometrie struktury cílí na teoreticky nejvýhodnější strukturu.
4. Aplikace na magnetický obvod ve tvaru toroidu. - Vybrané geometrie budou aplikovány na toroid a optimalizovány pro tisk.
5. Výroba vzorku a experimentální stanovení ztrát. – Bude vytvořen měřicí řetězec, na němž bude možné charakterizovat vlastnosti toroidu a změřit BH smyčky.

4 KONCEPČNÍ NÁVRH

Celá práce byla vypracována ve čtyřech krocích (obr. 8). Zpočátku, je provedena úvaha, která definuje postup, následně vymezí parametry pro návrh struktury a na základě obecně známých principů fyziky pak určí požadované vstupy do numerické analýzy a experimentu. Zároveň jsou zde načrtnuty obrysy potřebného numerického modelu i experimentu. Hlavním výstupem kroku 0 jsou koncepty elementů, které budou dále testovány. Kroky 1-3 se týkají realizace kroku 0. V kroku 1 je vytvořen numerický model pro testování konkrétních struktur, který je porovnán s analytickým výpočtem. Dále je vytvořen numerický model pro test elementů (viz kapitola 4.5 a 4.7), který je verifikován pomocí již vytvořeného numerického modelu (již ověřeného analytickým řešením). 2. krok používá vytvořených modelů z 1. kroku ke sběru dat a získává tak sadu struktur, které jsou vyhodnoceny. Dále jsou vybrány struktury, které jsou vytištěny a vyhodnoceny pomocí vytvořeného měřicího řetězce. V kroku 3 jsou vybrané struktury aplikovány na toroidní jádro. Všechna toroidní jádra jsou otestována a porovnána mezi sebou. Experimentální a numerické výsledky jsou řádově srovnány. V budoucnu by mělo dojít k užšímu spojení numerického a experimentálního řešení.

V kontextu struktury práce pak bod 0 je rozpracován v této kapitole (Koncepční návrh), kroky 1 a 2 jsou obsaženy v kapitole Předběžný návrh. Poslední část je v kapitole detailní návrh a obsahuje kromě vyhodnocení numerických simulací toroidů i metodiku.

Vždy je pro návrh optimální struktury magnetického obvodu nezbytné vztahovat se k podmínkám, do nichž je obvod navržen a rovněž zohlednit možnosti a omezení technologie výroby.



Obrázek 8 Schéma práce

4.1 Úvodní úvaha

Z fyzikální podstaty platí, že pro omezení proudu je klíčové maximalizovat elektrický odpor. Ze vztahu pro elektrický odpor ve vodiči pak vyplývá, že je nepřímo úměrný vodivosti a obsahu plochy průřezu, ale přímo úměrný délce vodiče. Zjednodušeně se tedy jedná o problém rozdělení plochy na vodivé smyčky, aby součet jejich délek byl maximální, při minimálním hypotetickém průřezu. Problém však nelze zjednodušit pouze na maximalizaci obvodu struktury. To proto, že proud, protékající pod povrchem až do hloubky vniku (skin efekt), neopisuje dokonale obvod, ale členitost naopak způsobí, že proud si cestu zkrátí a nerovnost pak lze vnímat jako zvětšení průřezu. Každá tato neefektivita je pro navržení efektivní struktury nežádoucí. Proto lze z tohoto hlediska vnímat kruh nebo i dlouhou SFC křivku, jako optimální tvar.

Jelikož hysterezní i vířivé ztráty závisí na lokální magnetické indukci a pro správnou funkčnost obvodu je zapotřebí dosáhnout alespoň potřebné hodnoty průměrné magnetické indukce, lze usoudit, že čím je magnetická indukce rozložena rovnoměrněji, tím je struktura efektivnější. I z tohoto úhlu pohledu se členitější povrch nevyplatí.

Třetím pohledem je pohled skinefektu, kdy se vyplatí co nejmenší struktura pro co nejrovnoměrnější rozložení proudu v struktuře i v celém obvodu při zanedbatelné tloušťce izolační vrstvy. To proto, že plocha kde prochází minimální vířivý proud je nevyužitá pro prodloužení smyček. Proti tomuto kritériu se staví fill faktor, který se zmenšováním struktury klesá.

4.2 Parametry návrhu

V rámci simulací jsou rozlišovány parametry návrhu struktury na vnější, vnitřní a hodnotící. Vnější, které znázorňují magnetické pole, které na obvod působí. Zejména frekvenční rozsah odpovídající aplikaci, pro kterou je obvod navrhován, je důležitý. Vnitřní, které popisují vlastnosti navržené struktury a jsou tedy neměnné. V rámci testů bude zkoumán zejména vliv velikosti a tvaru. A hodnotící, které jsou klíčové pro vyhodnocení efektivity struktur. Mezi ně patří magnetická indukce, která v této práci bude hlavním hodnotícím parametrem a dále měrný ztrátový výkon celkový, hysterezní a vířivý (viz tabulka 1).

Tabulka 1 Rozdělení parametrů

Vnější parametry:	Vnitřní parametry:	Hodnotící parametry:
H, f	Velikost, tvar, materiál, vodivost, fill faktor	$B_{\text{průměrná}}$, P_{tot} , P_v , P_h

4.3 Technologická omezení

Výsledný obvod bude vyráběn pomocí PBF-LB z železo-kobaltového prášku. Na základě konzultace s výrobou byly získány geometrické limity tisku:

1. Minimální tisknutelná tloušťka stěny (0,2 mm)
2. Minimální tisknutelná tloušťka mezery (0,2 mm)
3. Minimální tisknutelný úhel (45° , pro tisk v malém měřítku se může lišit)

Z těchto limitů vyplývá, že pro maximalizaci fill faktoru, udávajícího poměr užitého materiálu a izolace, je třeba počítat s izolační vrstvou o tloušťce 0,2 mm, což je minimální tisknutelná mezera. Minimální tloušťka stěny odpovídá úrovni detailu, který lze tisknout. Tyto limity ohraničují rámec, ve kterém bude optimální struktura hledána. Ostatní technologické limity budou zohledněny až pro návrh struktury k tisku.

Pro vysypání prášku bude v budoucnu do toroidu vytvořen otvor, což rozšiřuje možnosti tvarů. Experimentální testy budou zatím probíhat s práškem uvnitř, po odstranění prášku budou provedeny komparační testy.

4.4 Numerický model

Numerický model pro testování struktur byl pro simulace předpokládán obdobný jako v článkách [1; 2; 7; 11], kde se skládá z toroidu ovinutého cívkou. V podstatě se jedná o umístění 2D struktury reprezentující řez toroidem do nestacionárního magnetického pole působícího ve směru normály k této ploše. Předpokládá se sinusová excitace s volitelnou frekvencí.

Vzhledem k problematičnosti přímého postupu zjištění ztrát při konstantním B , bylo přistoupeno k časově efektivnější metodě: za konstantního H je zjištěno průměrné B a průměrné vířivé ztráty. S chybou lze pak přepočítat vířivé ztráty na ztráty při konstantním B . Numerický model je zaměřen na vířivé ztráty, takže nejsou uvažovány jiné typy ztrát.

Pro výběr vhodné struktury bylo zvoleno kritérium maximalizace magnetické indukce B při konstantní magnetizační intenzitě H . Toto kritérium je ekvivalentní maximalizaci poměru B/H , tedy efektivní permeability navrhované struktury. Při konstantním buzení magnetického obvodu tak lze přímo porovnávat schopnost jednotlivých struktur vést magnetický tok. Struktura s vyšší hodnotou B/H vykazuje nižší magnetický odpor a efektivněji využívá magnetický materiál, což je z hlediska návrhu magnetických obvodů přirozené optimalizační kritérium.

Samotné vířivé ztráty nejsou při konst. H vhodným porovnávacím kritériem, protože při snižování velikosti dochází ke snižování množství účinného materiálu a k rychlému poklesu indukce. Výsledkem je průběh bez nenulového minima, jehož optimum by odpovídalo triviálnímu řešení s minimálním podílem magnetického materiálu. Takové řešení je z hlediska funkce magnetického obvodu nerelevantní. Vířivé ztráty lze sice na konst. B s chybou přepočítat, ale s klesající velikostí výsledky rovněž neodpovídají skutečnosti, protože malé prvky nemusí být schopny dosáhnout požadované průměrné B , což přepočet nereflektuje. Proto zvolené kritérium maximalizace B při konstantním H představuje stabilní a fyzikálně smysluplný způsob porovnání navrhovaných struktur. Současně nepřímě podporuje výběr struktur s vyšší efektivní permeabilitou, což vede ke snížení požadované magnetizační síly pro dosažení daného magnetického toku.

Přepočet P_v na P_v při konstantním B

Jelikož jsou ztráty dle analytického řešení přímo závislé na lokální magnetické indukci ve druhé mocnině, lze pomocí poměru přepočítat a přibližně zjistit ztráty při jiné indukci. Je-li splněn předpoklad stejného rozložení B v prvku, pak lze pro přepočet použít $B_{průměrná}$ místo $B_{lokální}$. Vzhledem k nelinearitě v numerickém modelu je tímto způsobem vnesena chyba. Později bylo provedeno i porovnání a výsledky získané iterační metodou hledání vhodného H se většinou liší od přepočítaných výsledků do 5% viz tabulka 2.

Potíže mohou nastávat nejen kvůli nelinearitě, ale také v případě saturace, kdy dojde ke změně rozložení pole.

$$P_{V(konst\ B)} \approx P_{Vaktuální} \frac{B_{požadované}^2}{B_{aktuální}^2}$$

Tabulka 2 Odchylka ztrát od přepočítaných ztrát

Struktura:	Hr	Hs	Qr	Qsl	QsL	QsX	THr2	THs2	Tp	TQsX	TQsX2
Ztráty	0,142	0,077	0,151	0,082	0,089	0,039	0,095	0,113	0,970	0,091	0,115
Přepočet	0,141	0,076	0,150	0,081	0,087	0,039	0,095	0,112	0,567	0,088	0,095
Odchylka	0,7%	1,7%	0,4%	2,0%	2,4%	1,8%	-0,1%	1,2%	41,5%	3,2%	17,5%

4.5 Metoda elementů

Jednou z klíčových částí práce je návrh metody elementů. Protože test celých struktur by byl výpočetně i časově náročnější a především by výsledky odrážely konkrétní struktury a zobecnění výsledků by bylo značně limitováno, bylo přistoupeno na tzv. metodu elementů (obr. 9). Metoda elementů spočívá v rozdělení nekonečné 2D plochy na stejné elementy, které jsou testovány samostatně. Každý element se skládá z izolační vrstvy o poloviční hodnotě vůči minimální tisknutelné a jeho velikost je charakterizována průměrem kružnice vepsané do elementu bez uvážení izolace. Izolační vrstva nemusí být po celém obvodu, takže v realitě dojde ke spojení elementů. Velkou výhodou tohoto přístupu je univerzálnost. Není třeba testovat všechny křivky, stačí otestovat elementy, z nichž se křivky skládají a pro tvorbu struktury použít maximum elementů, které vyšly nejlépe.



Obrázek 9 Schéma metody elementů

4.6 Ověření numerického modelu

Než byl model pro elementy použit, byla provedena jeho verifikace pomocí porovnání výsledků s analytickým přístupem. Pro tento účel byly otestovány geometrické prvky lamela (délka je konstantní) a čtverec z důvodu příznivého tvaru pro analytický výpočet. Zároveň byly na těchto tvarech testovány vlivy jednotlivých parametrů viz tabulka 3.

Tabulka 3 Úvodní simulace sloužící k porovnání s analytickým řešením a k testování vlivů parametrů

Testovaný parametr	Vstupní hodnoty	Výsledné grafy
Vliv frekvence	$f = \{15; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 250; 300k; 6000; 9000\}; [Hz]$ $k \in \mathbb{N} \wedge k < 11$	
Vliv velikosti	$l = \{0,5; 1,0; 2,0; 4,0\} [mm]$	
Vliv tvaru		
Vliv izolace	$t = \{0; 0,1\} [mm]$	
Vliv materiálu	{AlSi420 Behanit, Carbonsteel, Hiperco50 Steel_1008, Vacoflux50}	
Vliv vodivosti	$\sigma = \{1; 2; 4; 8; 20\} [MS/m]$	

4.7 Výběr geometrie elementů a ověření metody

Na základě souhrnu získaných informací byly zvoleny dva koncepty elementů: čtvercový a šestiúhelníkový. Prvním důvodem je již zmíněná podobnost kruhu (minimum zbytečných hran), druhým je schopnost vyplnit plochu bezzbytku. Šestiúhelníkový koncept byl vybrán ve variantě spojený element I a samostatný element, čtvercový element má navíc kromě již zmíněných variant variantu spojený L a variantu spojený X. Tyto elementy byly otestovány podle tabulky 4. Přehled elementů a zkratk viz tabulka 5.

Ověření správnosti metody elementů proběhlo úspěšným srovnáním výsledků lamely z předchozích simulací a lamely tvořené z elementů (viz kapitola 5.1.3).

Tabulka 4 Koncepční návrh struktury, výběr elementů

Testovaný parametr	Vstupní hodnoty	Výsledné grafy
Vliv frekvence	$f = \{15; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 250; 300k; 6000; 9000\}; [Hz] \quad k \in \mathbb{N} \wedge k < 11$	
Vliv velikosti	$l = \{0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 2,1; 3,0\} [mm]$	
Vliv tvaru	 	
Vliv izolace	$t = \{0; 0,1\} [mm]_{zz}$	
Vliv způsobu propojení elementů	   	

Tabulka 5 Přehled konceptů elementů

Element	samostatný	spojený		
		rovný	zahnutý	křížový
šestiúhelník	Hr	Hs	-	-
čtverec	Qr	Qsl	QsL	QsX

4.8 Způsob vyhodnocení struktur

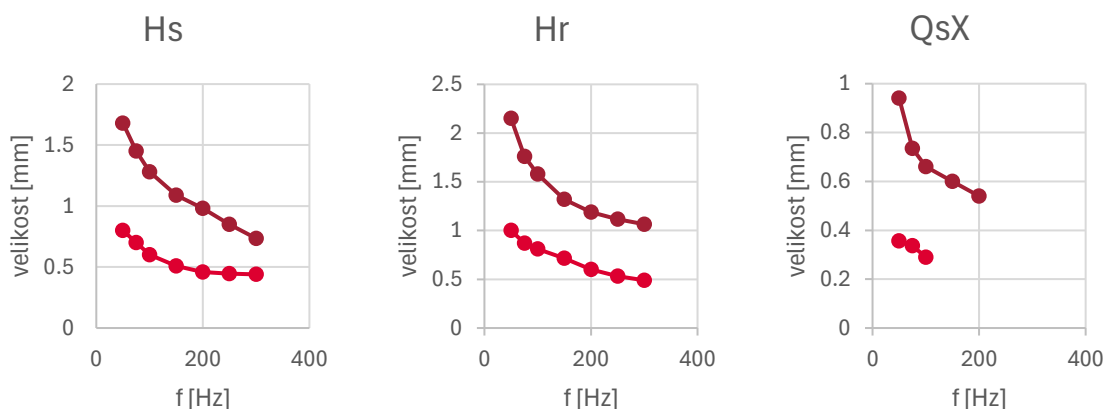
Na základě obdržení výsledků získaných metodou elementů je pak pro zvolenou aplikaci vybrána struktura s maximální průměrnou magnetickou indukcí B . Vyhodnocení probíhá nejprve volbou frekvence. Z grafu závislosti na velikosti je pak získána maximální hodnota.

Tato diplomová práce předpokládá pracovní frekvenci v rozmezí 50 až 300 Hz.

Aby bylo možné porovnávat výsledky pro frekvenční rozsah bylo zapotřebí získat optimální velikosti elementů pro požadovaný frekvenční rozsah. Zde je třeba poznamenat, že není jeden správný způsob, jak výsledné velikosti dosáhnout. Jedná se o práci s daty a výsledek bude proto vždy odpovídat použité statistické metodě.

Zvolený postup výběru velikosti elementu je následující. Pro každou z testovaných frekvencí je nalezena maximální hodnota B , od které je odečtena zvolená hodnota B (0,1 T) a jsou nalezeny dvě velikosti elementu odpovídající nové hodnotě B' (obr. 10). Ze získaných hodnot je vytvořen jeden graf závislosti maximální a minimální velikosti na frekvenci. Z tohoto grafu byla vybrána velikost, která nejlépe vyhovuje frekvenčnímu rozsahu.

Tato metoda je sice pouze přibližná kvůli nižší hustotě dat, ale pro daný účel postačující vzhledem k tomu, že průřez toroidu je tvarově vymezen, protože musí být velikost i tvar elementů upraven.



Obrázek 10 Grafy s rozsahem akceptovatelných velikostí. Pro strukturu QsX nebylo možné získat všechna data, proto byla velikost zvolena nejen na základě výsledků ale i s ohledem na tisknutelnost.

4.9 Aplikace struktur

Získané výhodné struktury jsou dále aplikovány na toroid, přičemž elementy jsou deformovány tak, aby lépe vyhovovaly průřezu toroidu a aby byly tisknutelné.

V prvním kroku aplikace je cíleno na vyplnění struktury elementem o získané velikosti. V druhém kroku je pak struktura optimalizována pro tisk.

Aplikace se řídí těmito zásadami:

1. Minimální odchýlení se od optimální velikosti
2. Maximální fill faktor
3. Tisknutelnost
4. (Minimální omezení mechanických vlastností)

Problematickým prostorem je hranice magnetického obvodu. Zde je nezbytné elementy deformovat, ale aby byly stále tisknutelné. Kvůli tomu, že je prostor vymezený, může dojít k paradoxním situacím, např. že se při zmenšení elementu zvýší fill faktor, nebo se nezmění. Těchto možností je třeba využít. Kromě toho byly některé elementy protaženy, nebo seříznuty, aby dobře vyplňovaly prostor.

Poslední část úprav se týká tisknutelnosti a mechanických vlastností. Jsou zde přidány prvky, které umožňují tisk a zlepšují mechanické vlastnosti obvodu. Jedná se o mostky a propojení mezi elementy s minimální tisknutelnou tloušťkou (0,2 mm).

Tyto struktury jsou následně numericky vyhodnoceny.

4.10 Experiment a ověření experimentu

V této části práce budou vytištěny první vzorky toroidů z FeCo prášku. Ty budou dále pomocí standardního měřicího řetězce vyhodnoceny a to jak bez, tak s tepelným zpracováním. Prášek zůstane prozatím uvnitř toroidů.

Aby bylo možné výsledkům věřit bude otestován nejprve toroid s již známou charakteristikou, s níž budou nově naměřené hodnoty porovnány.

4.11 Seznam omezení a zjednodušení metody

- Hysterezní ztráty jsou v modelu zanedbány
- U přepočtu ztrát z konst. H na konst. B se předpokládá stejné rozložení B , ale při dosažení saturace toto rozložení neodpovídá
- Nejvýhodnější velikost je předpokládána v blízkosti velikosti s maximální efektivní permeabilitou
- Simulace probíhají při konst. H
- Metoda maximálního $B_{průměrná}$, nevede přímo na nejvýhodnější strukturu.

4.12 Seznam předpokládaných výstupů

- Metodika návrhu struktur
- Metoda testování elementů
- Element struktury pro AM
- Struktury pro AM toroid
- Zásady návrhu, vliv parametrů a pozorované principy
- Numerický model v Ansys a Matlab
- Měřicí řetězec

4.13 Využití jazykového modelu

Pro časově efektivnější postup bylo využito jazykového modelu ChatGPT. Nástroj byl uplatněn při tvorbě kostry kódu Matlab live script, dále byl přínosný pro rychlou konzultaci myšlenek a pro jejich utřídění. Velmi účinný je pro předběžné řešerše. Z textové části pomohl s formulací kapitoly 1, 2.3 a 4.4. Vzhledem k relativní nespolehlivosti nebylo žádoucí jeho využití v podstatných částech práce co do obsahu i do textu.

5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

Předběžný návrh je zaměřen na tvorbu a ověření numerického modelu a zahrnuje celou experimentální část práce. Výsledkem předběžného návrhu je jak vyhodnocení elementů a experimentu, tak také stručný popis vlivu parametrů na průměrnou magnetickou indukci a ztráty.

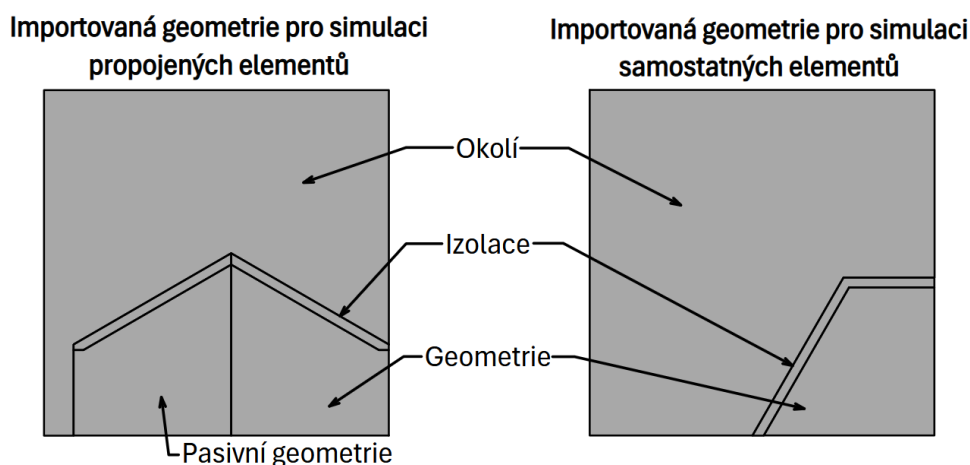
5.1 Tvorba a ověření numerického modelu

5.1.1 Numerický model

Numerické simulace byly vypočteny v aplikaci Ansys Electronics Maxwell3DDesign (EddyCurrent), výsledky byly dále zpracovány programem Matlab Simulink a připraveny k vyhodnocení.

Geometrie

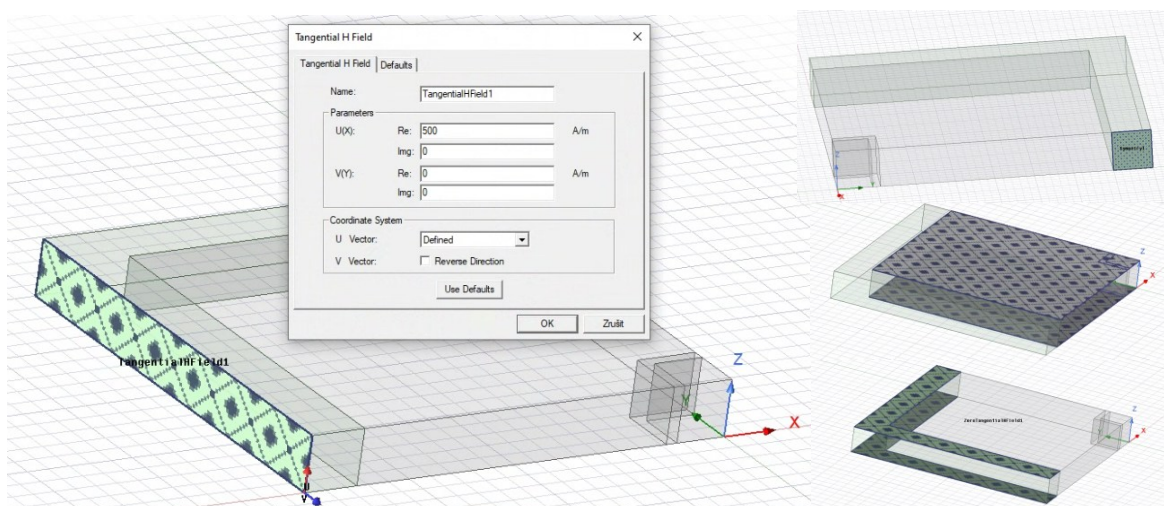
Importovaný soubor se skládá z testované geometrie, izolační vrstvy a z okolí (obr. 11). Na rozdíl od simulací v rešerši bude cívka nahrazena okrajovou podmínkou. U spojených elementů je součástí také pasivní geometrie, která slouží pouze k vytvoření odpovídajících podmínek uvnitř testované geometrie. Pro zjednodušení simulace jsou využity podmínky symetrie a importována je vždy pouze část modelu. Pro usnadnění importu je část podmínek aplikována na rám, který je pro všechny simulace neměnný.



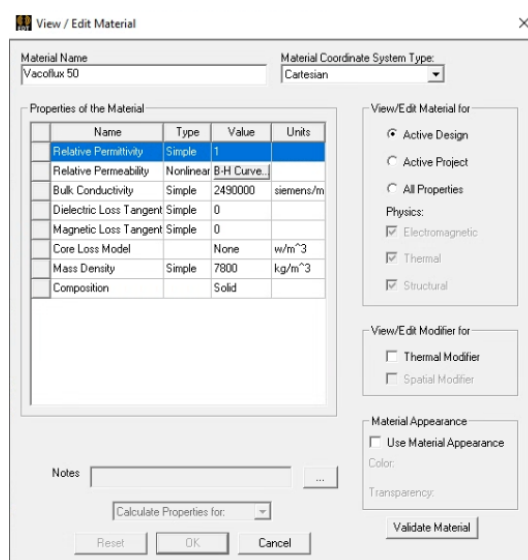
Obrázek 11 Popis geometrie importované do numerické simulace

Okrajové podmínky

Pro okrajové podmínky byl vytvořen rám, do kterého se importovala požadovaná geometrie, cílem je urychlit proces přiřazení okrajových podmínek. Na boky rámu je nastaveno „TangentialHfield“ a z čela „ZerotangentialHfield“ (obr. 12). Tyto podmínky simulují cívku ovinutou kolem toroidního jádra. Dále pak symetrie. Velikost H pole je 500 A/m ve směru osy Z , což je přibližná hodnota, kdy zvolený materiál dosahuje $B = 1\text{ T}$. Materiál je nastaven pro okolí a izolaci jako vakuum, geometrii je přiřazen materiál vacoflux50 (steel 1008¹) z materiálové knihovny (obr. 13).



Obrázek 12 Okrajové podmínky

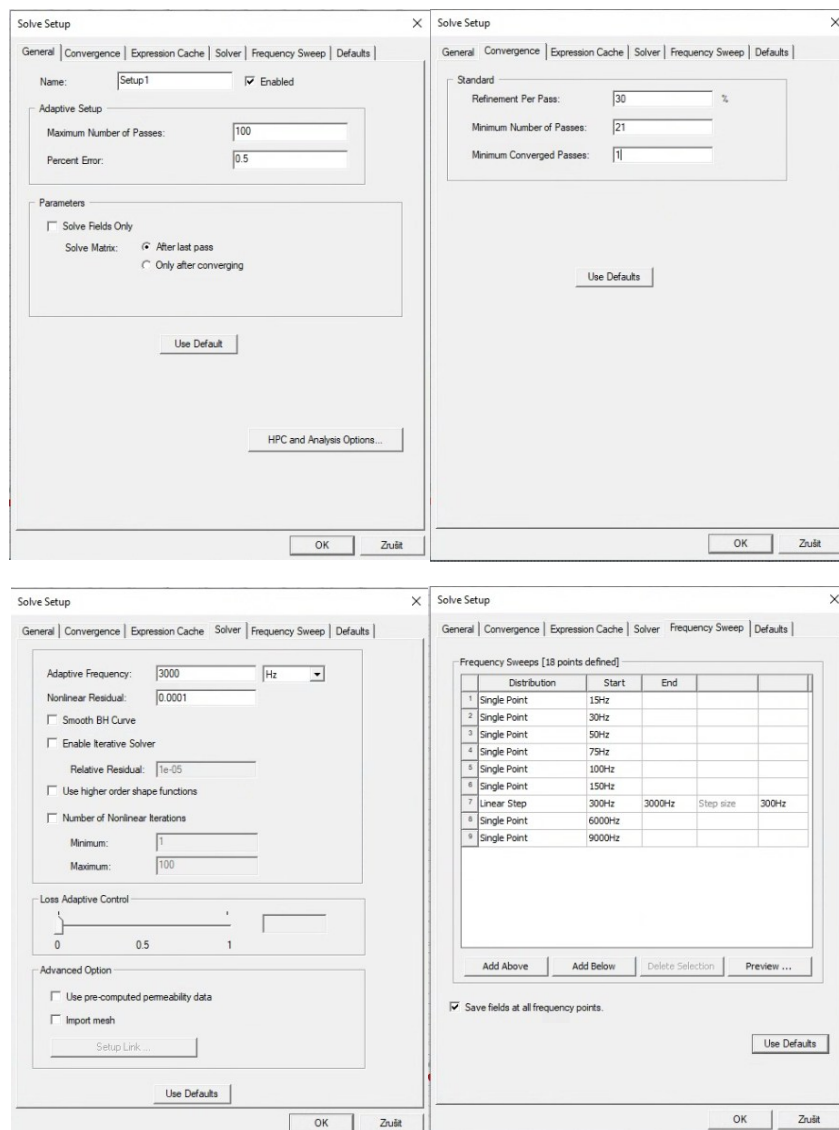


Obrázek 13 Nastavení materiálu.

¹ Původně byly všechny testy provedeny s materiálem steel 1008, ale vzhledem k materiálu použitému pro experiment bylo vše s výjimkou vodivosti přepočítáno pro vacoflux 50.

Setup

Setup simulace (obr. 14) je nastaven s procentuální chybou do 0,5%. Zjemnění sítě je 30%, Minimum Number of Passes je 21 a Minimum Converged Passes je 1. Frekvence je nastavena na 3 kHz. Ostatní frekvence jsou níže na obrázku 12 pod záložkou Frequency Sweep.



Obrázek 14 Set up simulace.

Export dat

Po provedení analýzy následuje definice nových proměnných z Ohmic loss a z magnetické indukce, které jsou integrovány přes objem geometrického prvku. Přes Fields report je vytvořena tabulka závislosti nových proměnných na testovaných frekvencích. Tabulka je dále exportována do Matlab Simulink, kde jsou vytvořeny konečné grafy.

Numerický model toroidu

Na základě výsledků z testu elementů byly vybrány elementy a jejich velikost: element šestiúhelníkový spojený i samostatný, dále čtyřúhelník spojený křížový. Ty byly implementovány na toroid. Nastavení numerického testu bylo shodné s testem geometrických prvků a elementů, až na minimální počet „průchodů“ 17 a navíc byl numerický test tentokrát proveden na celém modelu, bez rovin symetrie.

5.1.2 Ověření numerického modelu

V rámci ověření bylo porovnáno analytické a numerické řešení triviálních tvarů, tedy lamely a čtvercové struktury. Vzhledem k problematičnosti ověření výsledků průměrné magnetické indukce analytickou cestou, bylo pouze provedeno ověření vířivých ztrát a to pomocí vzorce:

$$P_e = \frac{\pi^2 B_{max}^2 a^2 b^2 f^2}{(a^2 + b^2) 6\rho}$$

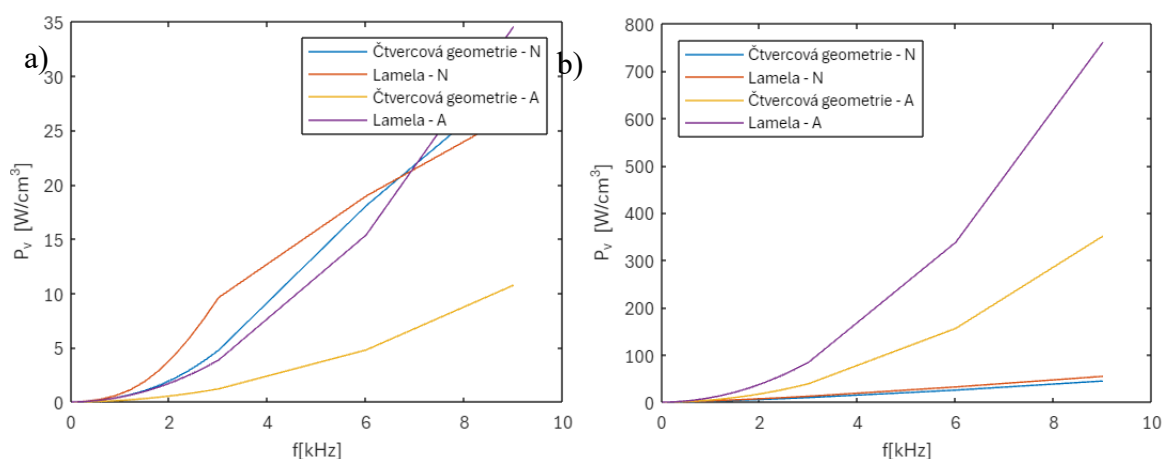
f [Hz] – frekvence

B_{max} [T] – špičková magnetická indukce

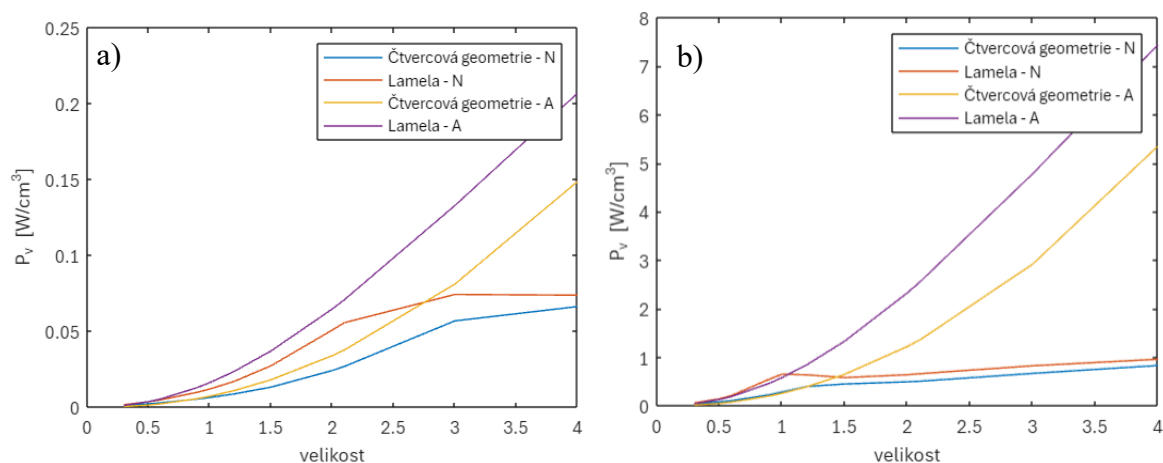
K_e [-] – koeficient vířivých ztrát

d, a, b [m] – rozměry tvaru

Materiálový model numerického řešení na rozdíl od analytického výpočtu uvažuje rozložení ztrát ve tvaru a také nasycení materiálu. Analytické řešení je pouze aproximativní. Z tohoto důvodu se při vyšších frekvencích, nebo vyšších velikostech testovaného prvku analytický výpočet významně odchyluje od simulace. Vzhledem k řádové podobnosti hodnot, lze předpokládat, že numerický model je v pořádku. Porovnání výsledků viz obr. 15 a 16.



Obrázek 15 Vliv frekvence na vířivé ztráty a) při velikosti 0,3 mm b) při velikosti 1,2 mm



Obrázek 16 Vliv velikosti na vířivé ztráty a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz

5.1.3 Ověření metody elementů

Metoda elementů byla verifikována pomocí lamely a pomocí spojeného a samostatného čtvercového elementu. Lamela o třech různých tloušťkách byla otestována metodou konstantního H nejprve samostatně a poté byly výsledky porovnány s lamelou vytvořenou z elementů (samostatný element na konce lamely a na zbytek délky spojený element). Až na tři výjimky u vířivých ztrát byla odchylka výsledků zaokrouhleně do 5% (tabulka 6). Na vině může být odchýlení se od ekvivalentního rozložení pole vlivem většího poměru velikosti a hloubky vniku. Pro lepší výsledek by bylo vhodné opakovat simulaci a případně prodloužit pasivní geometrii.

Tabulka 6 Porovnání výsledků lamely a lamely tvořené elementy.

Lamela tvořená elementy Porovnání B s lamelou				Lamela tvořená elementy Porovnání P_v s lamelou		
velikost [mm]:	0,6	1	3	0,6	1	3
frekvence [Hz]						
50	0%	-1%	1%	15%	16%	-2%
200	-2%	-5%	0%	13%	3%	0%
600	-5%	0%	0%	1%	-3%	0%

5.2 Experiment

Experimentální část má za cíl získat předběžné výsledky prvních výtisků a vytvořit podklady pro budoucí vývoj v této oblasti, zejména připravit postupy vyhodnocování.

5.2.1 Měřicí řetězec

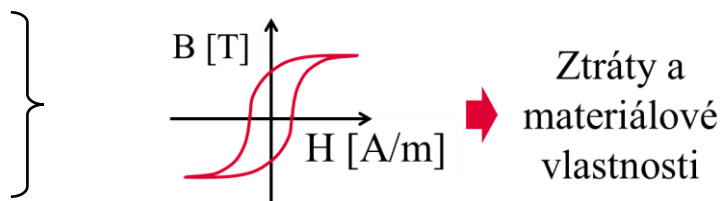
Měřicí řetězec (obr. 17) se skládá z funkčního generátoru, který generuje střídavé napětí (To je kontrolováno měřicí stanicí). Generátor má v sobě zabudovaný zesilovač, pomocí kterého je signál zesílen. Dále pak je proud veden na primární vinutí toroidu a je měřen proud. Z proudu $I(t)$ je dopočítáno $H(t)$. Na sekundárním vinutí toroidu je měřeno napětí $U(t)$ z něhož je získáno $B(t)$. Z $B(t)$ a $H(t)$ je vytvořena BH smyčka z níž je možné určit jednotlivé ztráty. Vzhledem k limitům použitých zařízení byl navíc k primárnímu vinutí připojen výkonový odpor.

Primární vinutí:

$$H(t) = \frac{I(t)N_1}{l}$$

Sekundární vinutí:

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S} \int U(t) dt$$



N.....počet závitů na vinutí

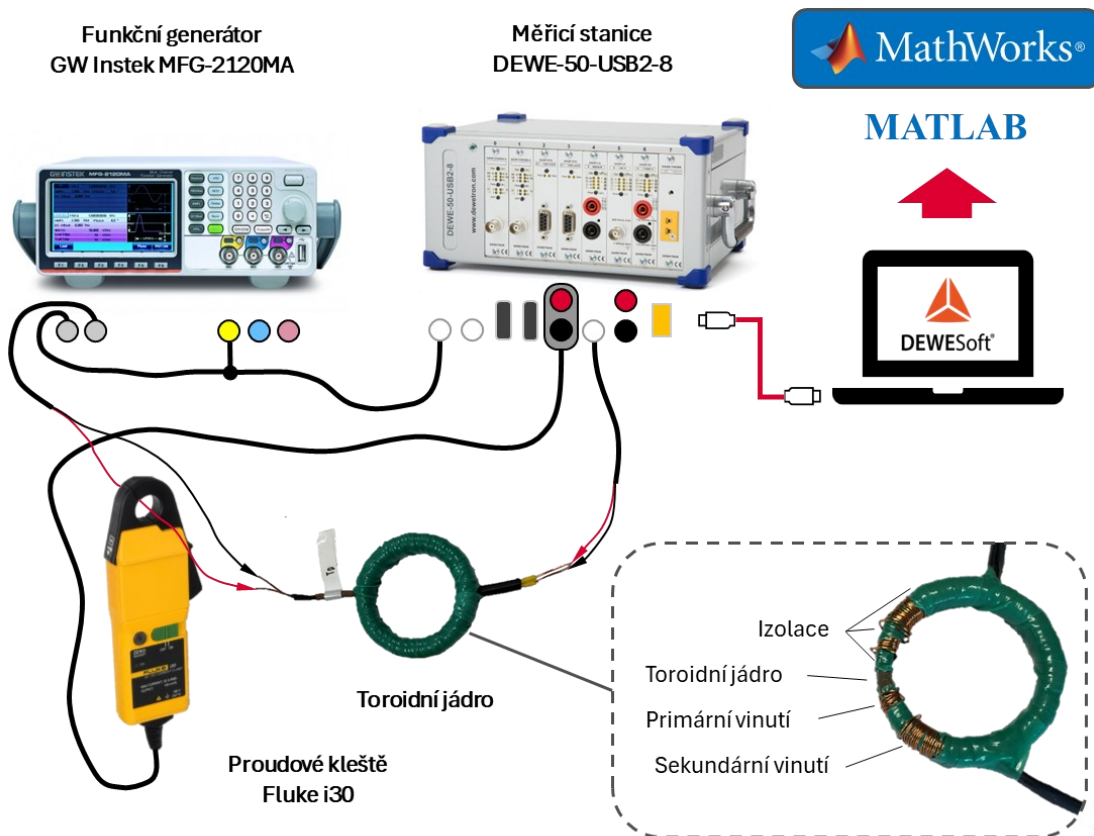
l.....efektivní délka cívky

S.....průřez toroidu

U.....napětí

I.....proud

t.....čas



Obrázek 17 Měřicí řetězec pro získání BH smyčky

5.2.2 Výpočtový model

DEWESoft

Popis nastavení DEWESoft7 by byl příliš rozsáhlý, proto jsou v příloze uvedeny vzorové soubory s nastavením pro každý toroid (viz elektronická příloha 1).

Matlab

Nejprve bylo zapotřebí vybrat data a zarovnat smyčky. K tomuto účelu byl vytvořen live script umožňující vykreslení získaných dat. Každá perioda je pro přehlednost vykreslena jinou barvou a při najetí na konkrétní hodnotu je ukázán index s číslem této hodnoty, což umožňuje přesný výběr periody.

Výsledky jsou dále zpracovány v samostatných live skriptech a to buď pro konstantní B [T], z čehož lze získat jednotlivé ztráty nebo pro konstantní frekvenci (0,1, nebo 1 Hz), za účelem zisku smyčky obsahující pouze hysterezní ztráty a obálkové křivky.

Struktura kódů s výsledky je tvořena dle této struktury:

1. Načtení souborů
2. Výběr rozsahu dat
3. Dva cykly „FOR“ v sobě: První umožňuje zpracovat více dat zároveň, druhý pak zpracovává výsledky (např. pro různé frekvence)
4. Zarovnání smyčky: Nejprve je smyčka zarovnána podle $I=0 \sim H=0$ horizontálně. Dále je zarovnána vertikálně podle střední hodnoty $B(H=0)$. To proto, že budící proud nemusí mít stejnou amplitudu v kladné a záporné části. Je ale předpoklad, že kladná potažmo záporná půlvlna symetrická je.
5. Získání výsledků (ztráty a charakteristické body)
6. Vykreslení smyček a výsledků

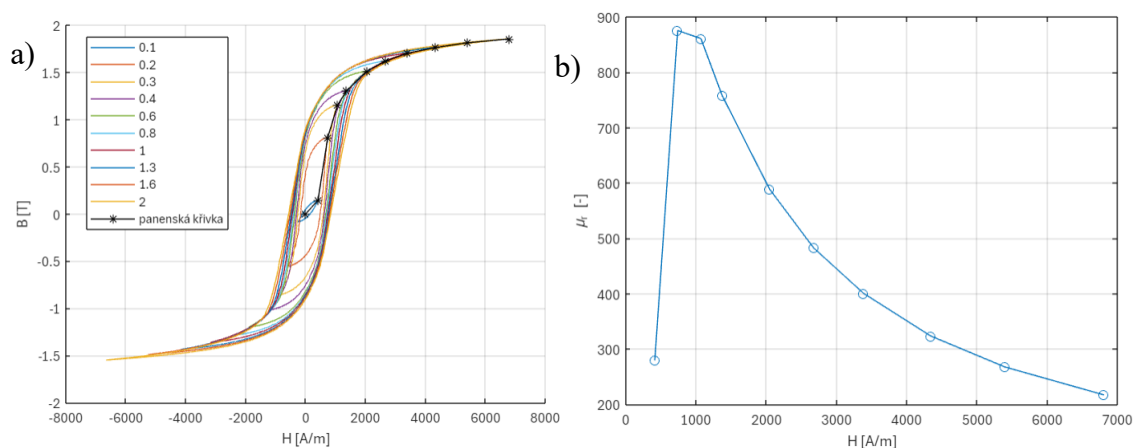
Pro určení jednotlivých typů ztrát je mnoho způsobů. V této práci byl zvolen zjednodušený přístup, který dává jednoznačné výsledky. Má ovšem limitující přesnost.

Z prvních dvou naměřených hodnot při nízkých frekvencích je v grafu závislosti ztrát na frekvenci vytvořena přímka reprezentující hysteretní ztráty. Vířivé ztráty jsou pak určeny jako rozdíl celkových a hysteretních ztrát. Dodatečné ztráty jsou zanedbány a tedy rozloženy mezi hysteretní a vířivé. Při nízkých frekvencích bývá podíl vířivých a dodatečných ztrát minimální, proto jsou zanedbány. Reálné hysteretní ztráty proto budou nižší než naměřené.

Obálka je vykreslena tak, že při nižší frekvenci jsou vykresleny BH smyčky pro různou velikost budícího proudu. Z každé smyčky je vytvořen bod $[H_{max}, B_{max}]$ a tyto body jsou pospojovány.

5.2.3 Ověření experimentu

Aby bylo možné ověřit správné fungování měřicího řetězce byl jako první změřen vzorek A (obr. 18), pro nějž byla charakteristika zjištěna dříve pomocí SVR REMAGRAPH. Vzorek A je vyroben z materiálu 11SMn30. Porovnání (tabulka 7) proběhlo pro frekvenci $f = 0,1$ a 1 Hz. V obou případech u smyček, kde $H_{max} \approx 6000$ A/m hodnoty řádově vychází. Odchylka výsledků je způsobená jednak nedokonalostí budícího signálu, šumem, popřípadě i odchylkou v konstantách vstupujících do výpočtu. Pro přesnější zjištění vrcholové hodnoty permeability by bylo zapotřebí více testů.



Obrázek 18 Toroid A: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 1$ Hz.

Tabulka 7 Porovnání měřené a referenční hodnoty u toroidu A

Veličina	Měření	SVR REMAGRAPH	Odchylka
W [kJ]	3,653	2,3	-59%
B_r [T]	0,88354	0,794	-11%
H_c [A/m]	511	354	-44%
$H(\mu_{\max})$ [A/m]	737	580	-27%
$H_{\max}$ [kA/m]	5,3967	5,69	5%
$\mu_{\max}$	861	906	5%
B_s [T]	1,8131	1,59	-14%

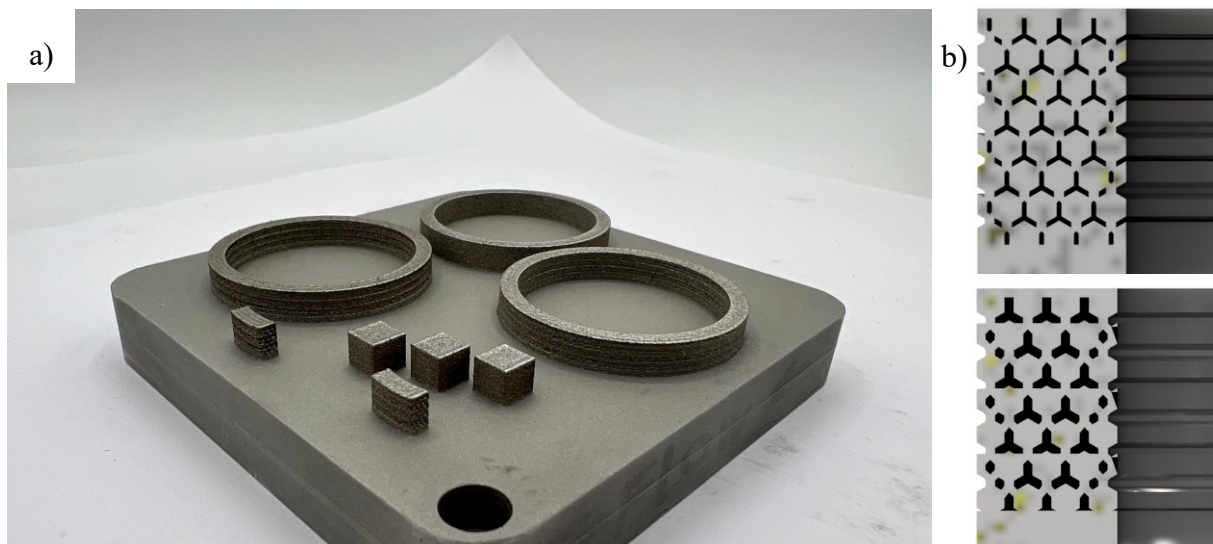
5.2.4 Aditivní výroba a tepelné zpracování

Výběr struktury byl proveden v rámci Odboru technické diagnostiky s ohledem na jiné projekty. Tisk toroidů a odladění tiskových parametrů zajistil Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií. Detailní informace zatím nebyly uvolněny pro tuto práci.

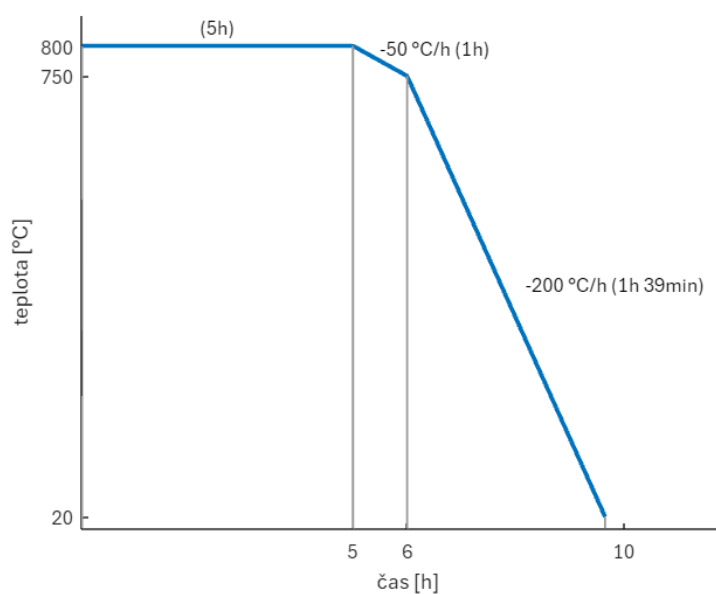
Předběžně byly tedy vytištěny tři toroidy (obr. 19a, 19b). Jejich struktura přímo nevychází z výsledků získaných pomocí metody elementů, nicméně pro počáteční ozkoušení systému a získání předběžných výsledků je postačující. Vzhledem k žádné dosavadní zkušenosti s výrobou z FeCo a chybějícímu materiálovému modelu přímo pro vytištěný materiál, nelze očekávat plnou přenositelnost numerických výsledků.

První toroid je plný a druhé dva jsou strukturovány pomocí samostatného šestiúhelníku o velikosti 0,6 mm. Tloušťka izolace je u jednoho 0,1 mm a u druhého 0,2 mm.

Po vyhodnocení vyrobených vzorků proběhlo tepelné zpracování (obr. 20). Žihání proběhlo při teplotě 800 °C po dobu 5 hodin. Dále následovalo pomalé ochlazování z 800 °C na 750 °C rychlostí 50 °C/h. Po dosažení cílové teploty byla rychlost poklesu teploty zvýšena na 200 °C/h. Vzorky byly zabalené do kalici fólie. Postup tepelného zpracování vycházel z doporučení katalogového listu výrobce.



Obrázek 19 a) Tisková platforma s tisknutými toroidy a vzorky. b) Šestiúhelníková struktura toroidů připravená pro tisk (izolace 0,1 mm nahoře, izolace 0,2 mm dole). Materiál v dolní části odpovídá tloušťce potřebné pro odřez od platformy.



Obrázek 20 Tepelné zpracování toroidů

5.2.5 Výsledky

Vzhledem k náročnosti měření na vybavení byly měřené rozsahy omezeny na generované napětí do 2 V. To neumožnilo testovat frekvence až do 300 Hz při zachování konstantní B .

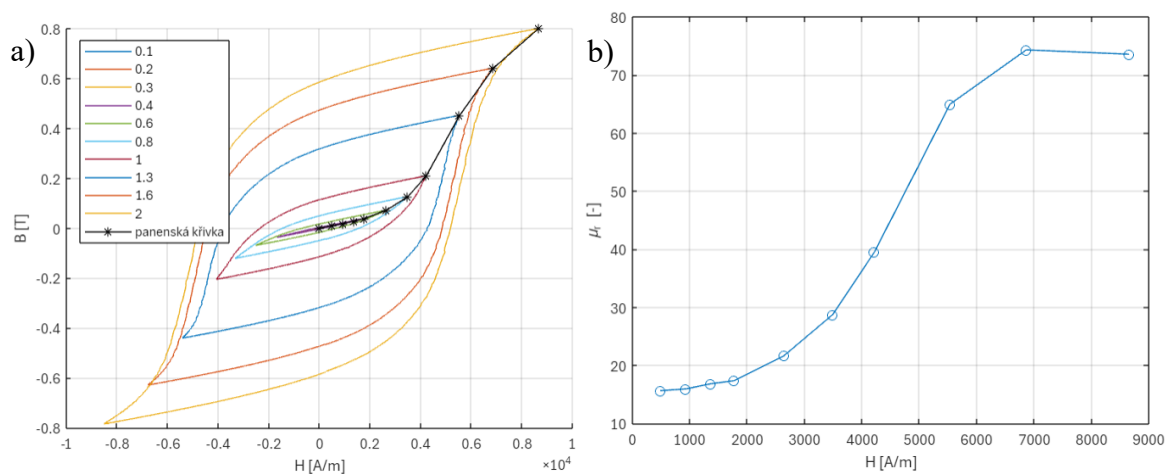
Cívky byly navíjeny ručně z měděného drátu o průměru 0,315 mm. Počet navinutých závitů před a po tepelném zpracování (TZ) viz tabulka 8 níže.

Tabulka 8 Počet navinutých závitů.

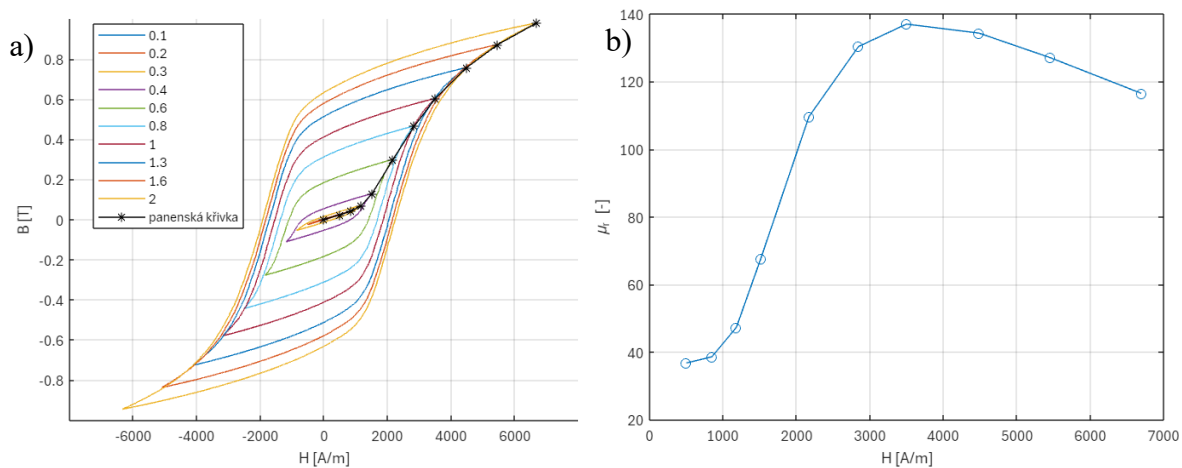
Toroid	N1	N2	N1 TZ	N2 TZ
A_Plny	248	184	-	-
FeCo_Plny	245	223	263	237
FeCo_0_6_0_1	242	229	255	200
FeCo_0_6_0_2	249	200	257	220

Před TZ:

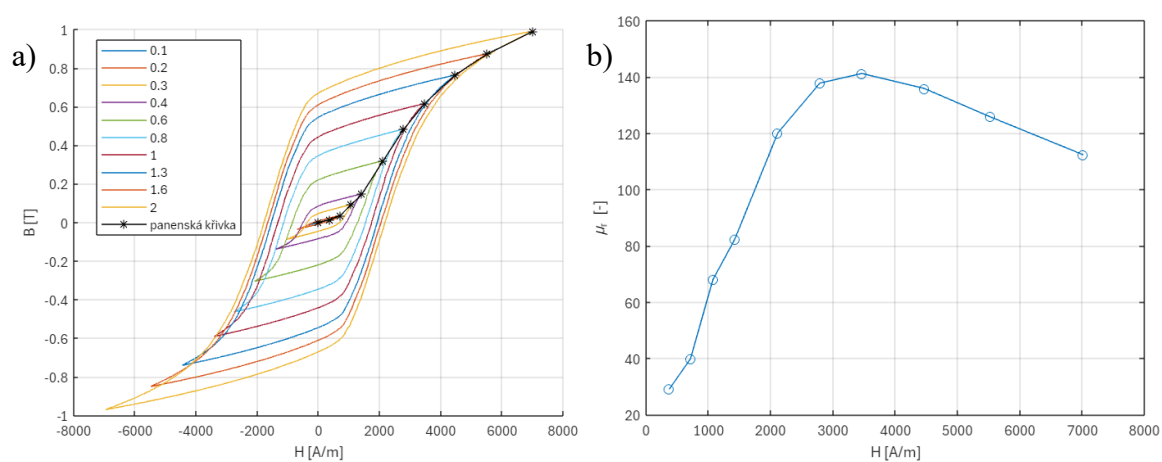
V této podkapitole jsou na obrázcích 21, 22, 23 obsaženy BH smyčky a permeabilita pro frekvenci 1 Hz. Pozitivní vliv strukturování toroidu je evidentní.



Obrázek 21 Toroid FeCo Plný: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 1$ Hz.



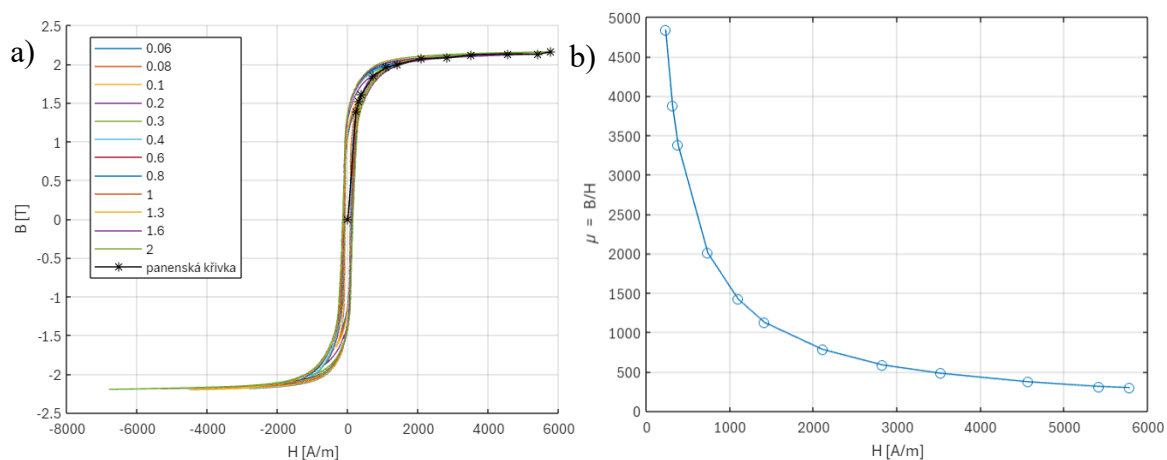
Obrázek 22 Toroid H0,6_0,1: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 1$ Hz.



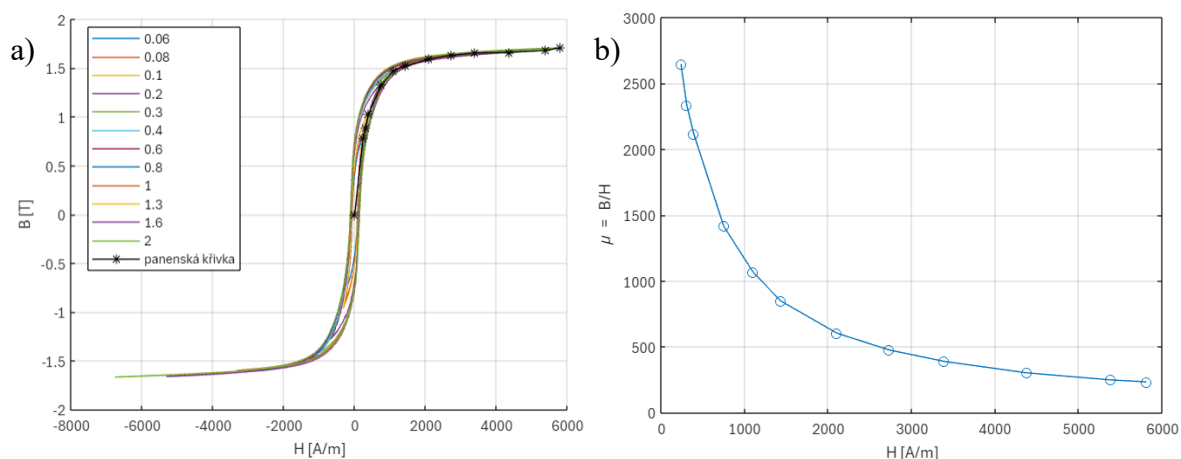
Obrázek 23 Toroid H0,6_0,2 a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 1$ Hz.

Po TZ:

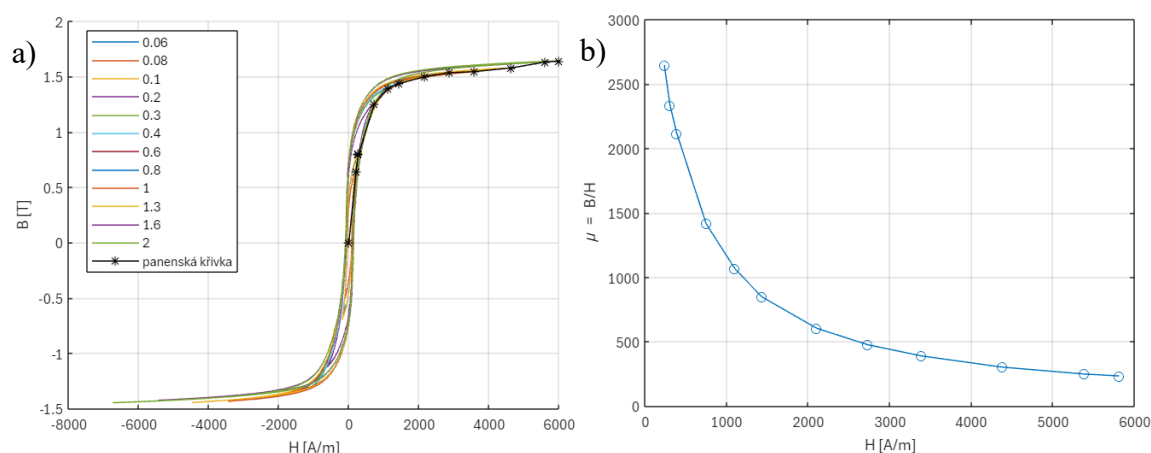
Po tepelném zpracování došlo ke zúžení smyčky a vysokému nárůstu permeability (obr. 24 až 26), ale také k poklesu ztrát asi o 1/3. (viz dále: „Porovnání ztrát“).



Obrázek 24 Toroid FeCo Plný: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 0,1$ Hz.



Obrázek 25 Toroid H0,6_0,1: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 0,1$ Hz.



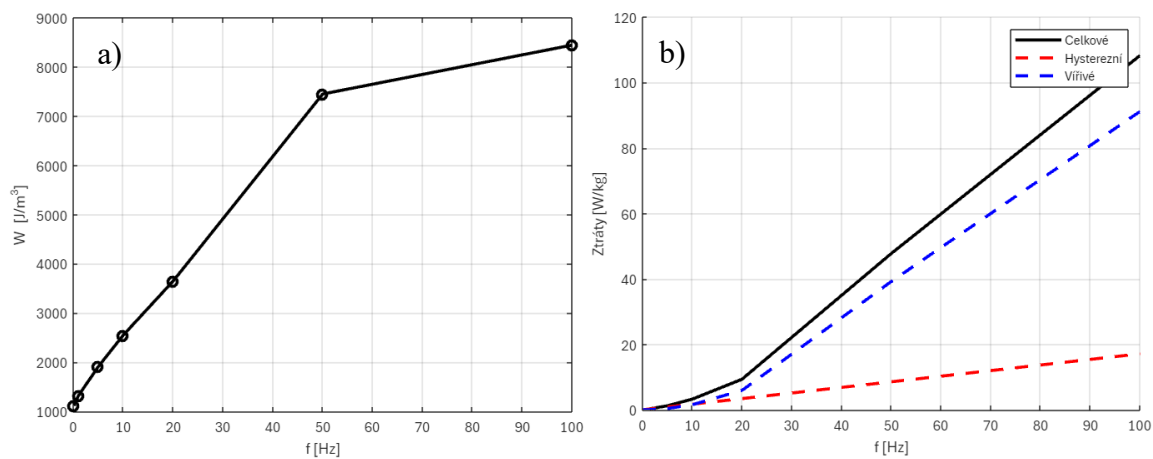
Obrázek 26 Toroid H0,6_0,2: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 0,1$ Hz.

Porovnání ztrát

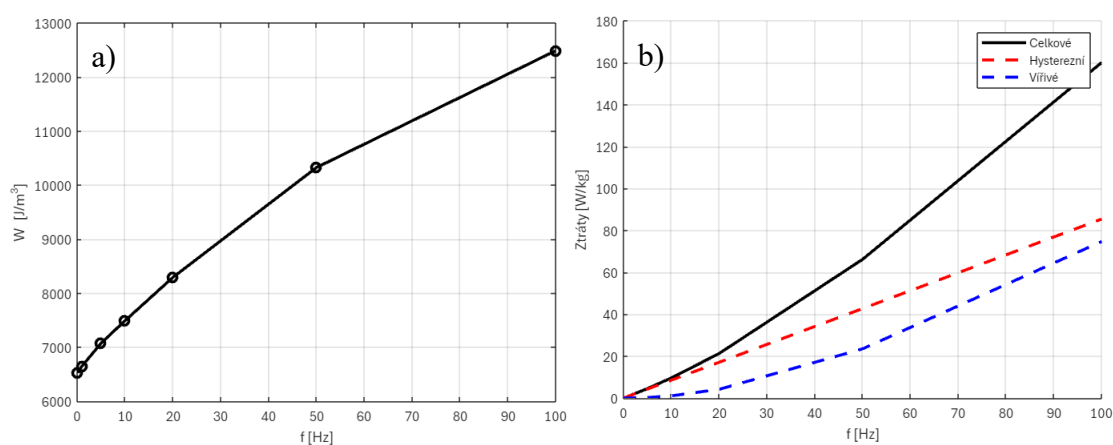
V této části jsou porovnány grafy ztrát jak pro vzorek A, tak i pro tištěné toroidy před (obr. 27 a obr. 28, 29, 33, 34, 35) a po TZ (obr. 30, 31, 32). Pro plný toroid před TZ se nepodařilo dosáhnout 1 T z důvodu limitu velikosti budicího napětí. Tento toroid lze tedy porovnat pouze s aditivními toroidy před TZ (viz „Před TZ“).

Z dat lze vyčíst, že vytištěné toroidy před TZ mají jednoznačně horší parametry oproti vzorku A. Naopak po TZ je lze označit za jednoznačně lepší. Proces způsobil radikální nárůst permeability, zúžení smyčky a tedy i snížení ztrát. Původně byly dominantní hysterezní ztráty, nyní jsou dominantní vířivé.

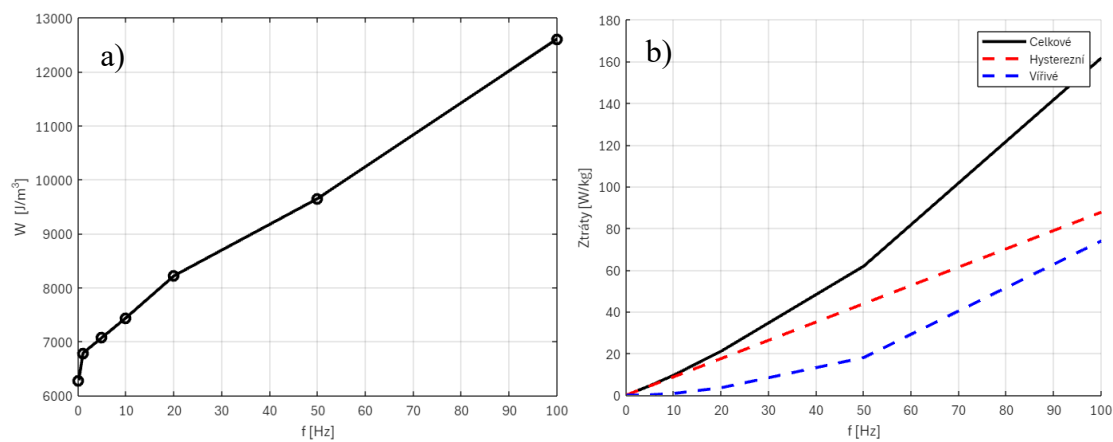
Před TZ byl vliv strukturování na ztráty zřejmý, po TZ ztráty jsou u strukturovaných toroidů nižší o třetinu ztrát plného toroidu. Zároveň je zřejmý pokles saturace vlivem strukturování. Je tedy otázkou zda to způsobuje prášek ponechaný uvnitř, nebo jiný faktor.



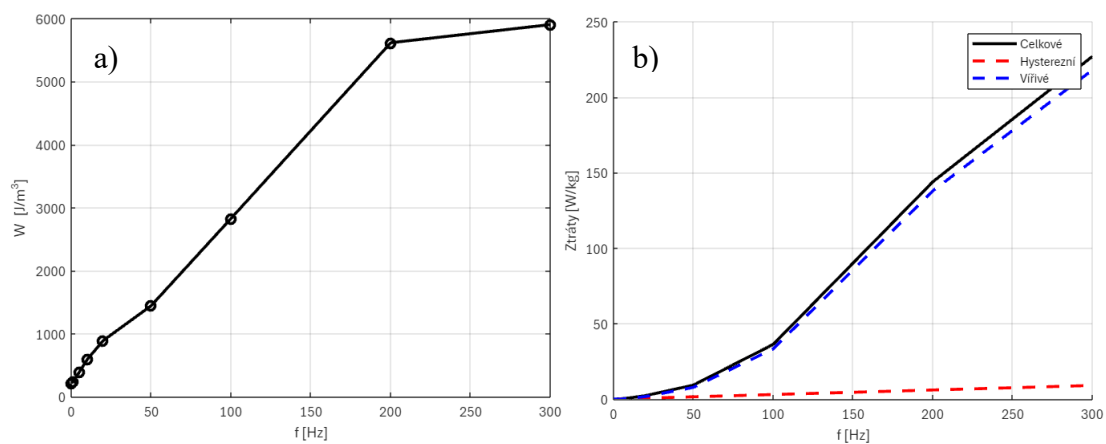
Obrázek 27 Toroid A: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B=1$ T. Původní konvenční vzorek.



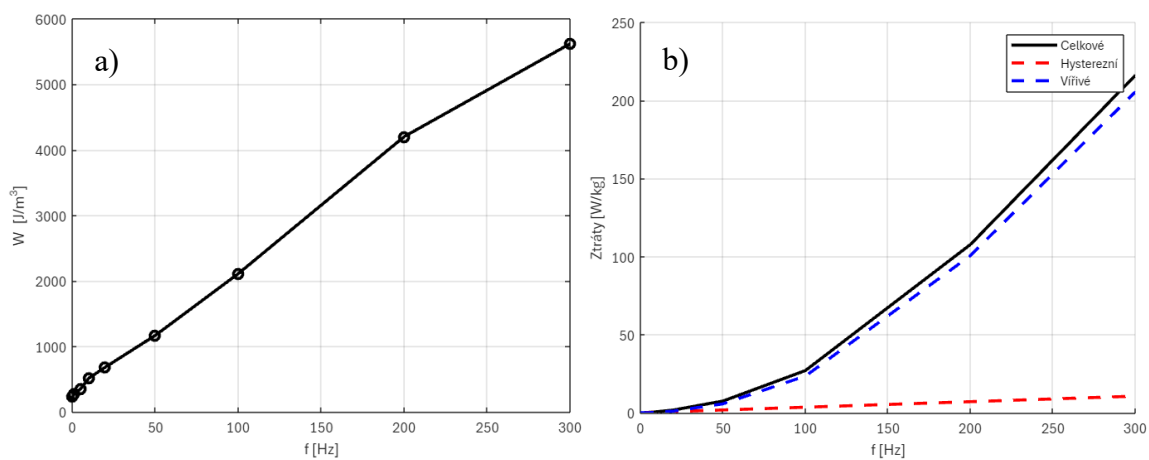
Obrázek 28 Toroid H0,6_0,1: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 1$ T. Před TZ.



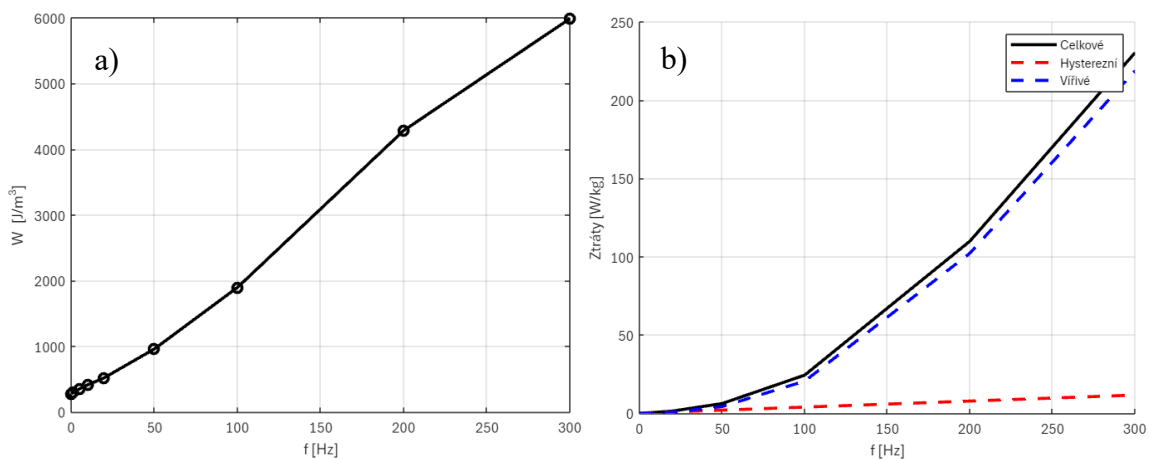
Obrázek 29 Toroid H0,6_0,2: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 1$ T. Před TZ.



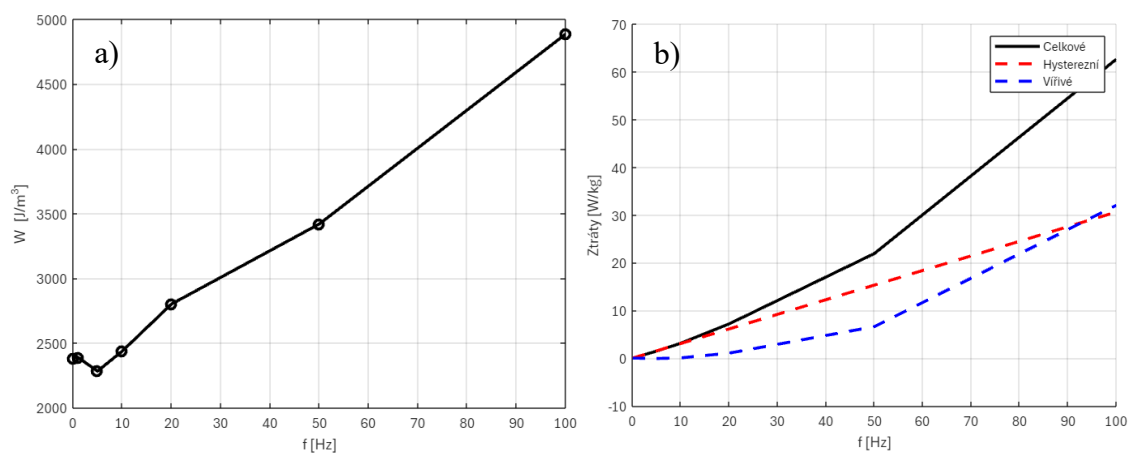
Obrázek 30 Toroid FeCo Plný: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 1$ T. Po TZ.



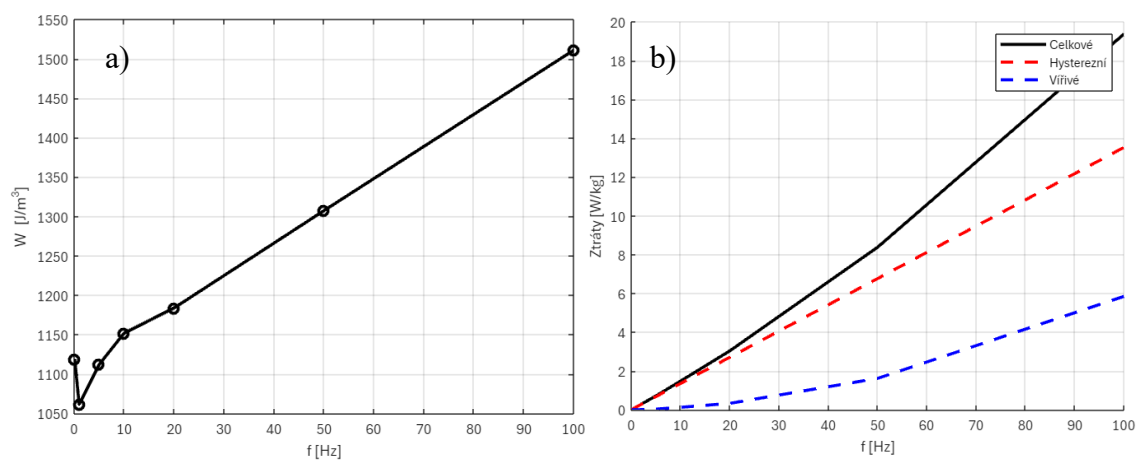
Obrázek 31 Toroid H0,6_0,1: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 1$ T. Hz.



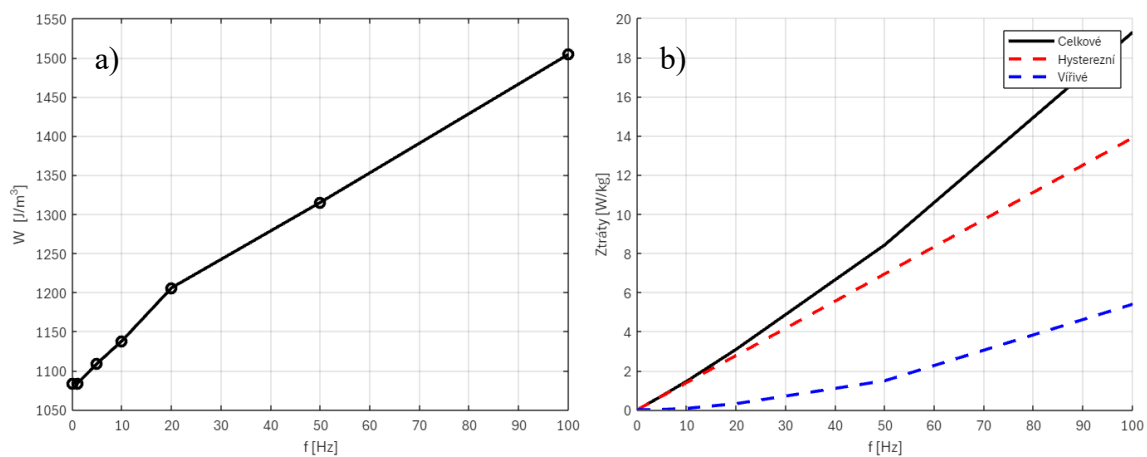
Obrázek 32_Toroid H0,6_0,2: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 1$ T. Po TZ.



Obrázek 33 Toroid FeCo Plný: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 0,3$ T. Před TZ.



Obrázek 34 Toroid H0,6_0,1: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 0,3$ T. Před TZ.

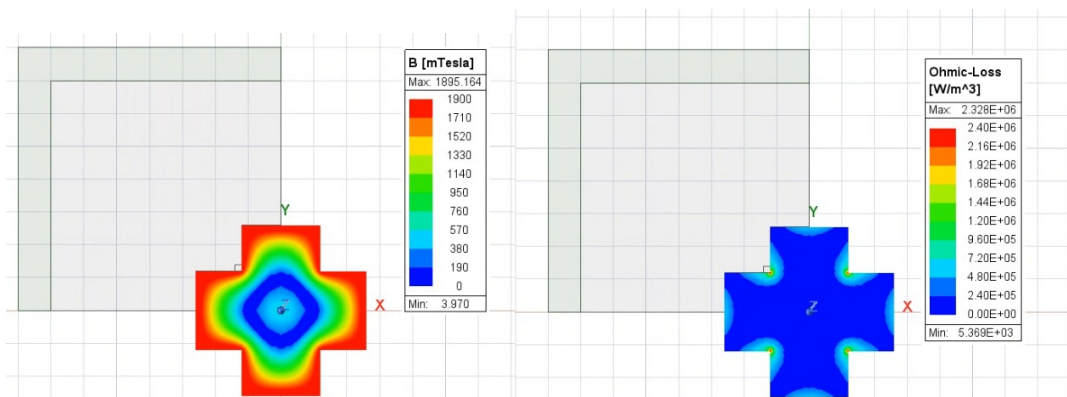


Obrázek 35 Toroid H0,6 0,2: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 0,3$ T. Před TZ.

5.3 Výběr struktury

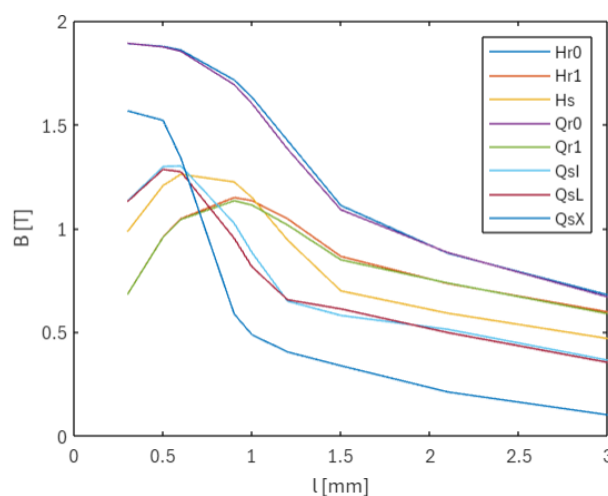
Nejvýhodnější struktura je vždy odvislá od vnějších podmínek (viz kap. 4). Pro porovnání struktur je výhodný graf $B(l)$, kdy pro zvolenou f a H lze snadno odečítat nejlepší strukturu. Jelikož struktura pracuje v určitém rozsahu frekvencí je potřeba optimalizovat tvar i pro zvolený frekvenční rozsah.

Z grafů závislosti $B(l)$, kde l je charakteristický rozměr, byla pomocí kritéria maximálního $B_{průměrná}$ vyhodnocena jako nejlepší struktura QsX (obr. 36) a to při frekvencích 50 až 300 Hz.

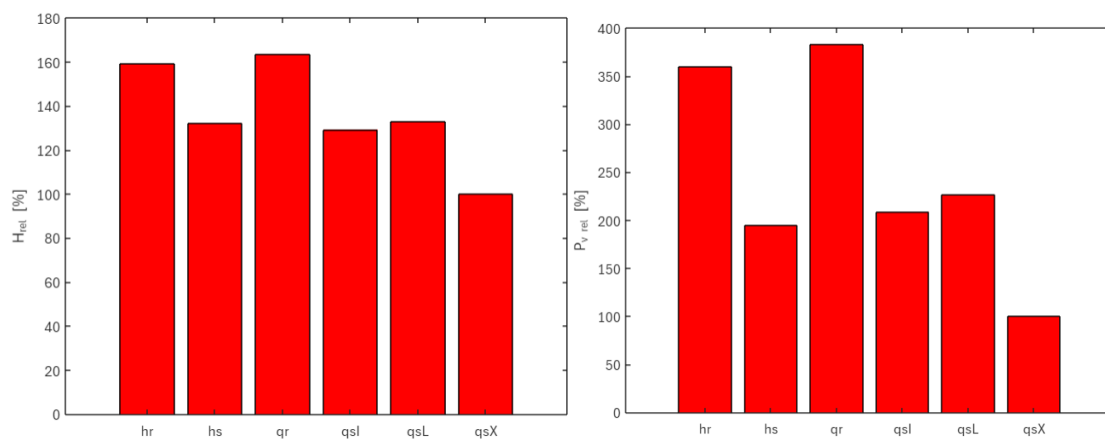


Obrázek 36 Čtverec spojený kříž (QsX)

Zvláště byl vybrán graf pro frekvenci 200 Hz (obr.37), jakožto vzorek z intervalu 50 až 300 Hz a z něj velikosti při níž dosahují jednotlivé struktury svého maxima. Pro tyto velikosti byly pomocí iterační volby H zjištěny vířivé ztráty, tak aby při daném H dosahovalo $B = l T$. Při porovnání vířivých ztrát (obr. 38) vychází rovněž nejlépe struktura QsX. Tento postup byl možný, protože pro každý tvar byla testována pouze jedna velikost a to při jedné frekvenci. Časová náročnost tedy byla akceptovatelná.

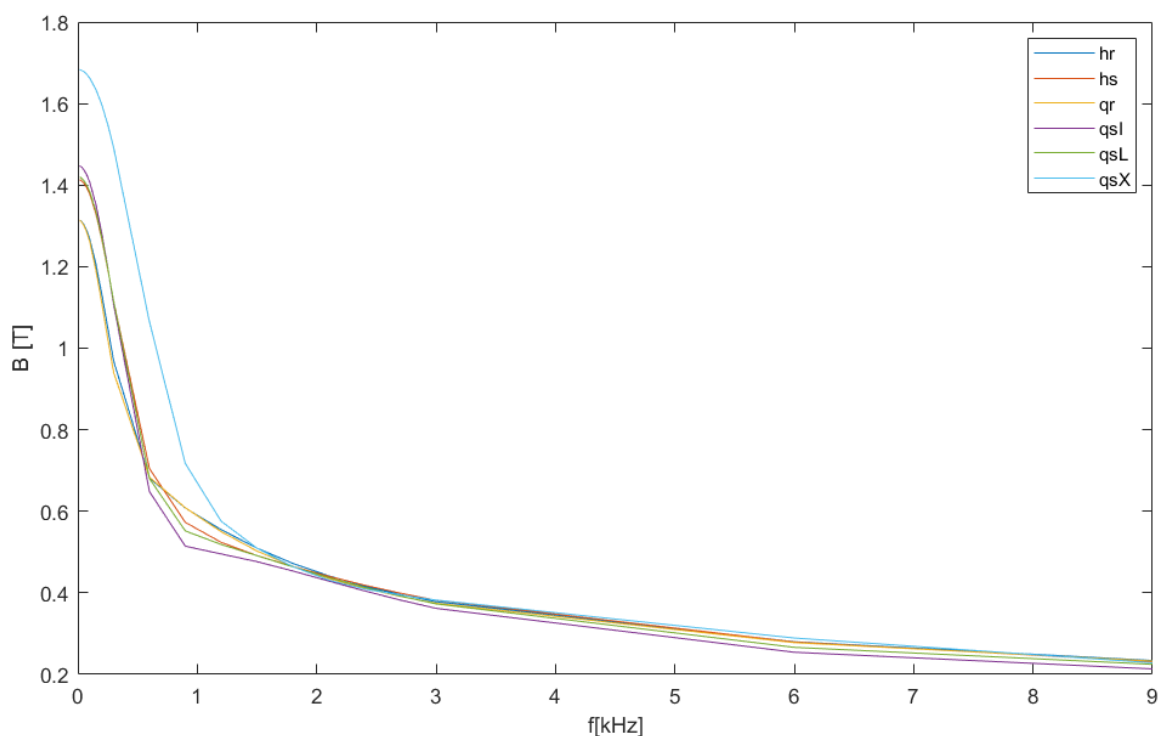


Obrázek 37 Závislost $B(l)$ při frekvenci 200 Hz.

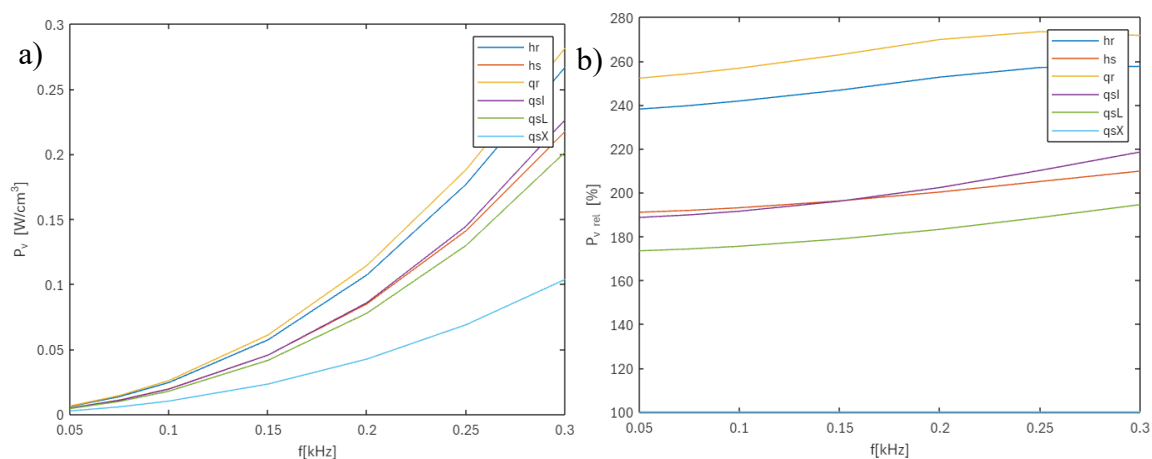


Obrázek 38 a) porovnání potřebné H pro dosažení $B=1T$, b) porovnání vířivých ztrát při $B=1T$

Vzhledem k tomu, že je cíleno na aplikaci 50 až 300 Hz, bylo přistoupeno k výběru velikostí jednotlivých elementů pro tento rozsah. Pro prvek QsX nebylo možné určit všechny potřebné hodnoty, protože nebyly otestovány elementy s velikostí pod 0,3 mm. Na základě výsledků a zejména kvůli tisknutelnosti struktury byla pro porovnání zvolena velikost 0,4 mm. Standardní postup viz kapitola 4.8. Výsledné struktury byly samostatně otestovány, přičemž ztráty byly přepočítány na konstantní B . Z tohoto hlediska se opět vyplatí element QsX (Obr. 39, 40). Kromě této struktury byly vybrány struktury šestiúhelníková samostatná a spojená, které jsou dále aplikovány na toroid. Jsou to zástupci jednotlivých typů propojení.



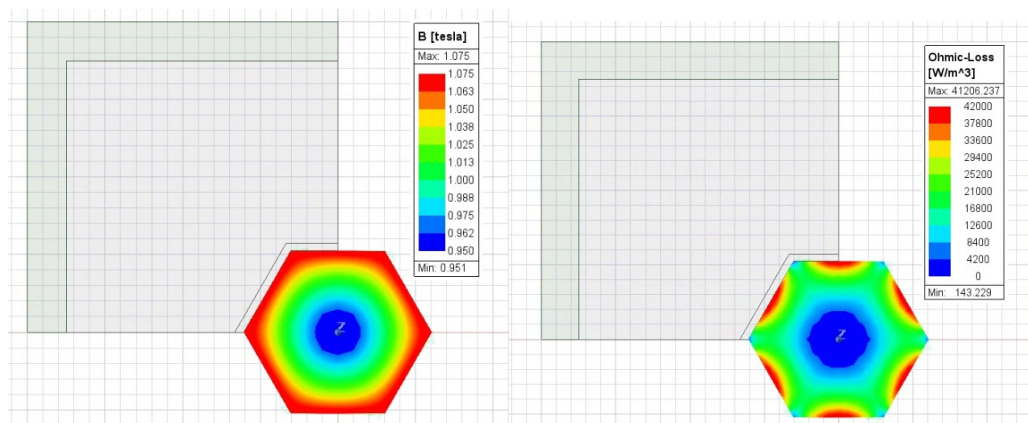
Obrázek 39 Závislost $B(f)$ pro vyvinuté elementy do 9kHz



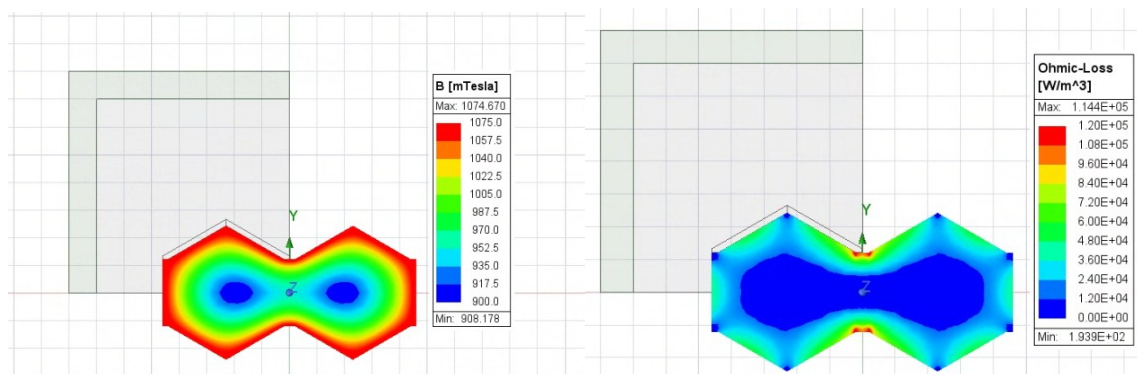
Obrázek 40 Závislost P_v na frekvenci při konst. B a) absolutní, b) relativní vůči QsX

5.4 Tvar výsledných polí

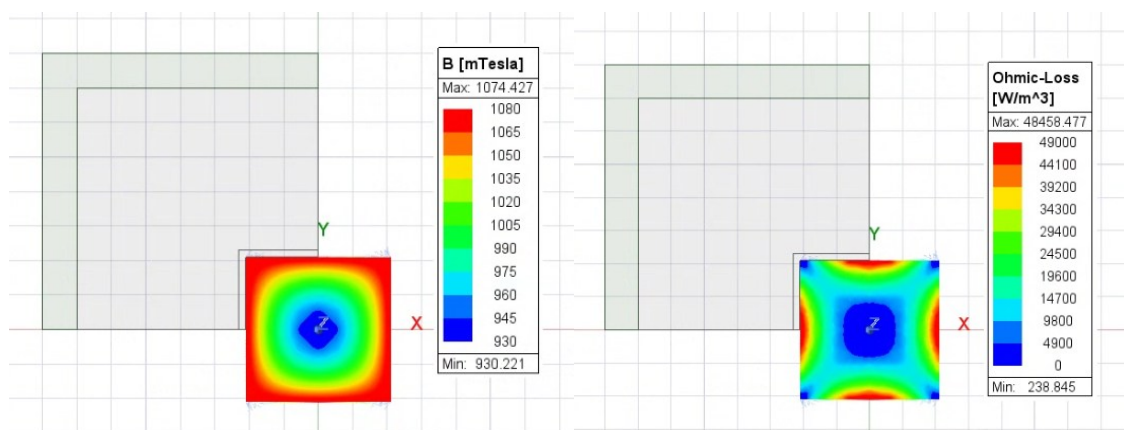
Na obr. 41 až 47 níže jsou výsledky pro tvary o velikosti kolem 2 mm při frekvenci 50 Hz. Z Ohmic Loss je patrné rozložení proudové hustoty v geometrii i chování proudu na hranách. Rovněž magnetická indukce ukazuje, že nejvyšších hodnot dosahuje na okrajích geometrie. Tyto obrázky slouží pouze pro vizualizaci problému, vyobrazení numerického modelu struktur a rozložení pole.



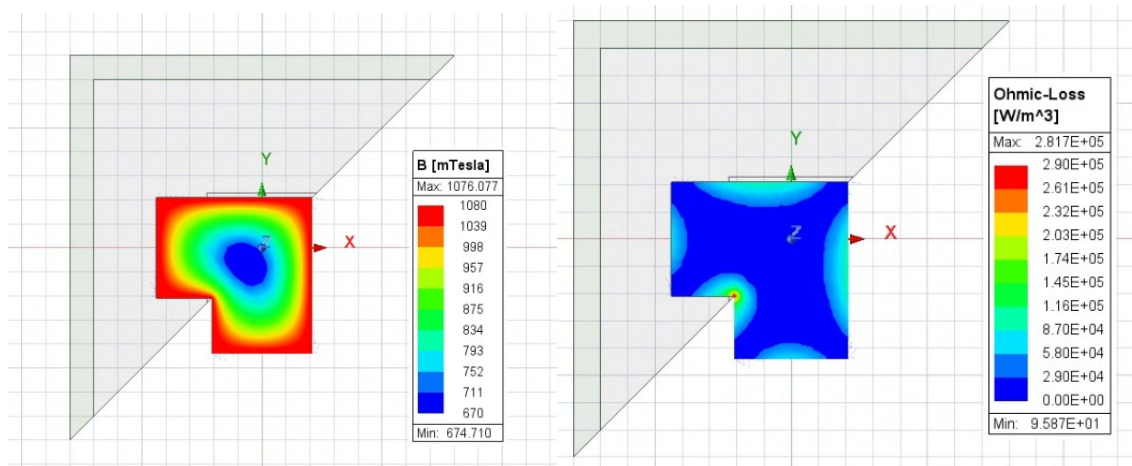
Obrázek 41 Šestiúhelník (Hex_samostatný/Hr)



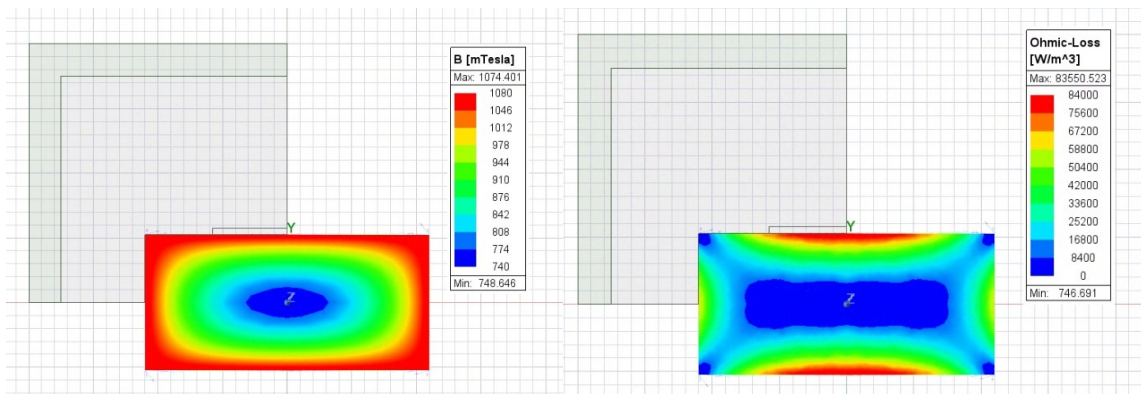
Obrázek 42 Šestiúhelník spojený (Hex_spojený/Hs)



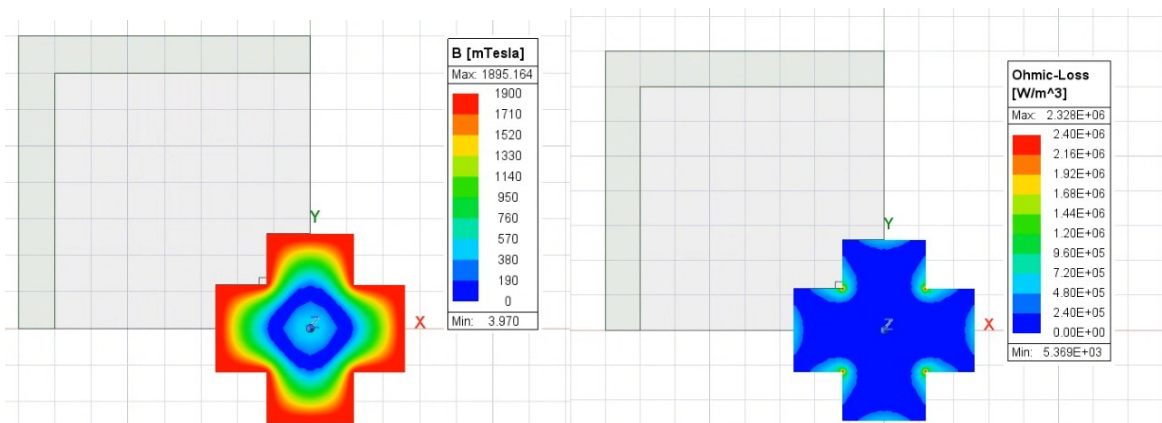
Obrázek 43 Čtverec samostatný (Quad_samostatný/Qr)



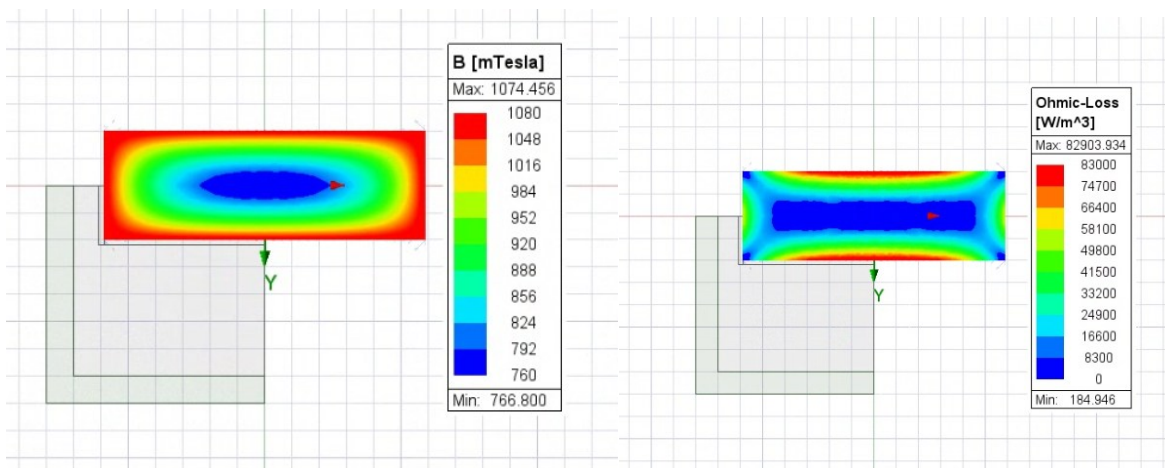
Obrázek 44 Čtverec spojený zahnutý (Quad_spojený_zahnutý/QsL)



Obrázek 45 Čtverec spojený rovný (Quad_spojený_rovný/Qsl)



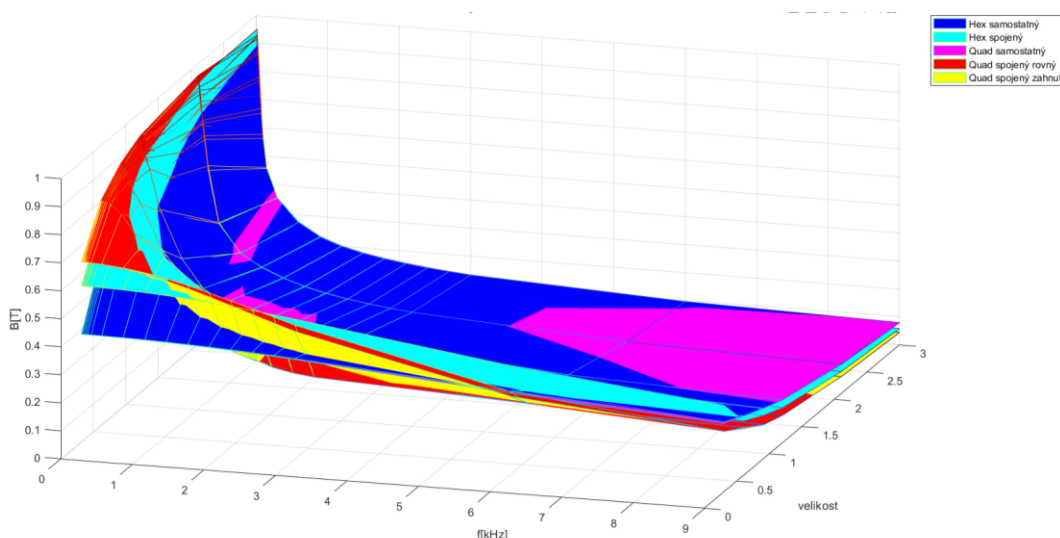
Obrázek 46 Čtverec spojený kříž (QsX)



Obrázek 47 Lamela (Lam)

5.5 Vliv parametrů

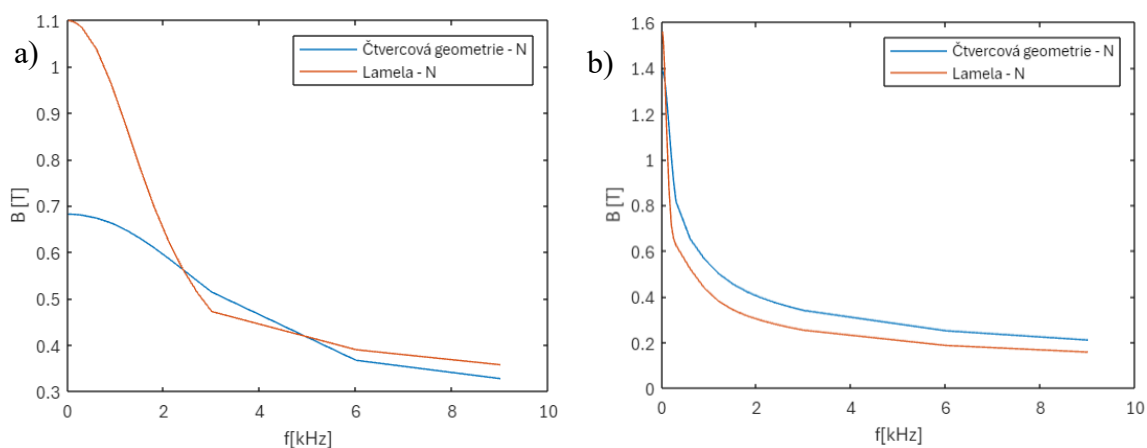
V rámci testování elementů byla pro každý element vygenerována data, která v 3D prostoru vytváří charakteristické plochy. Jedná se o závislosti $B(f, l)$ a $P_v(f, l)$, při konstantní H . Z grafu 48 je patrné, že kvazi-výhodnost elementů, daná výškou průměrné magnetické indukce, se liší v závislosti na velikosti i frekvenci. Nelze tedy uvést, který element je nejvýhodnější, aniž by nebyla známa např. frekvence. Pro přehlednost budou dále využity 2D grafy.



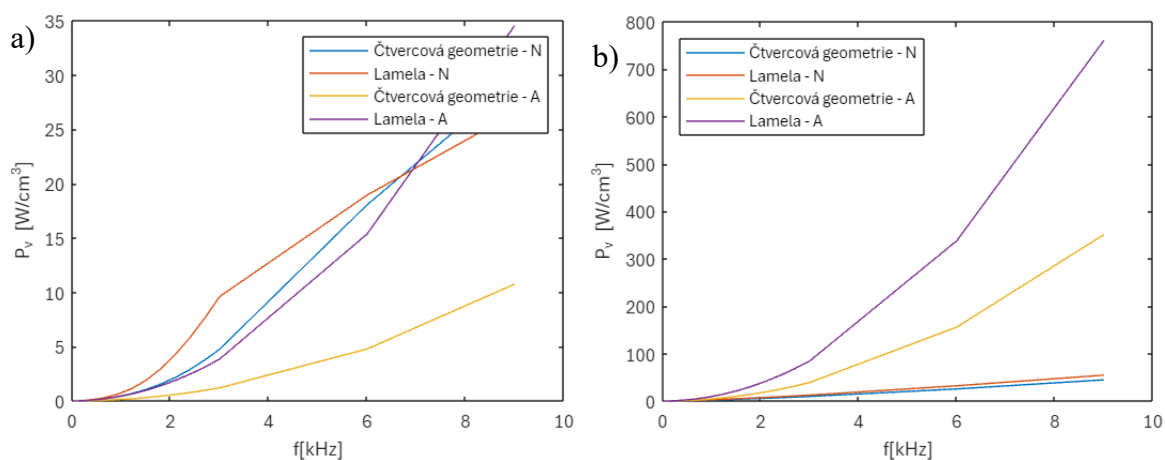
Obrázek 48 Graf porovnání elementů $B(f, l)$

5.5.1 Vliv frekvence

Vliv frekvence u lamely a čtvercové geometrie je znázorněn na grafech (obr. 49, 50). U menšího tvaru při nižších frekvencích analytické řešení dobře odpovídá numerickému, u většího prvku tomu tak je jen u frekvencí do cca 80 Hz. Graf většího prvku je strmější, ale počáteční hodnota B je vyšší. V grafech je tloušťka izolace zohledněna.

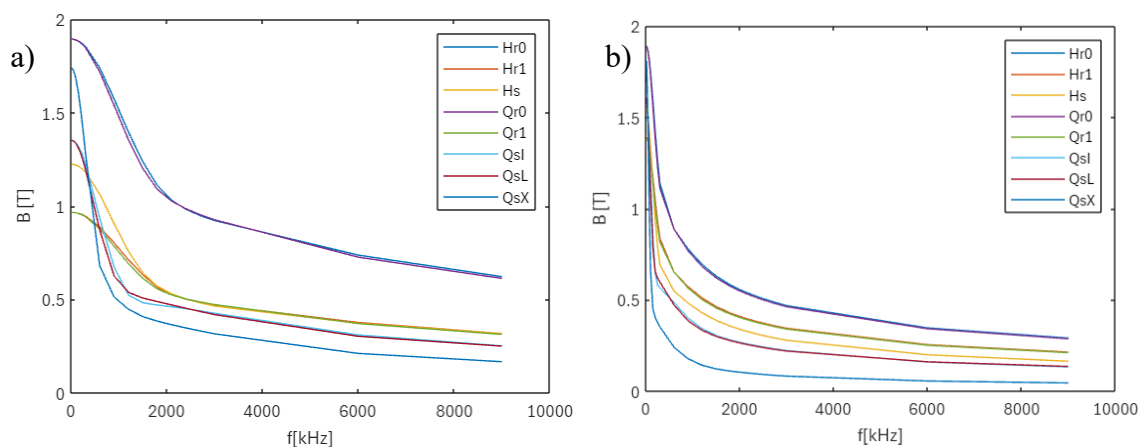


Obrázek 49 Vliv frekvence na magnetickou indukci a) při velikosti 0,3 mm b) při velikosti 1,2 mm

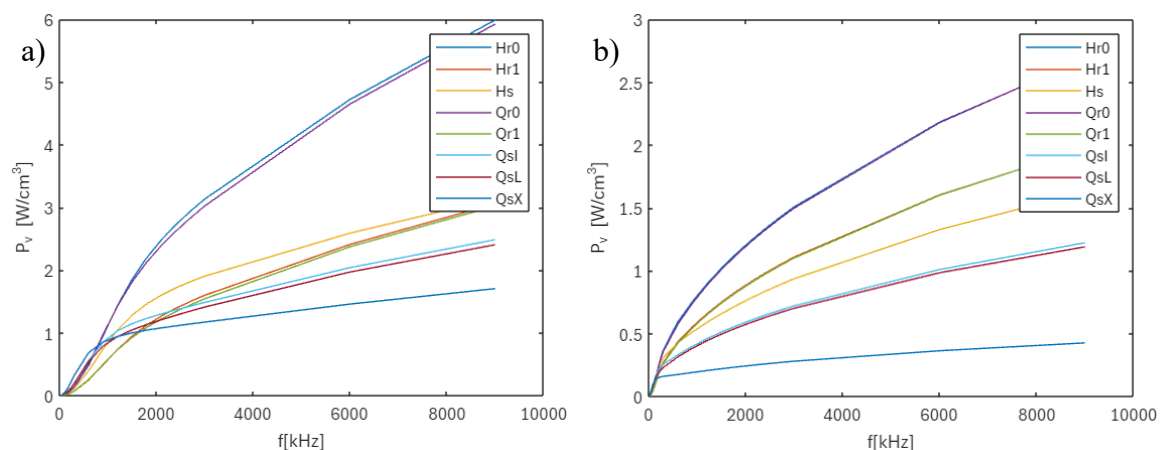


Obrázek 50 Vliv frekvence na vířivé ztráty a) při velikosti 0,3 mm b) při velikosti 1,2 mm

Vliv frekvence elementů ukazují grafy na obr. 51 a 52. S vyšší velikostí jsou grafy magnetické indukce strmější. Grafy budou využity i pro popsání jiných vlivů.



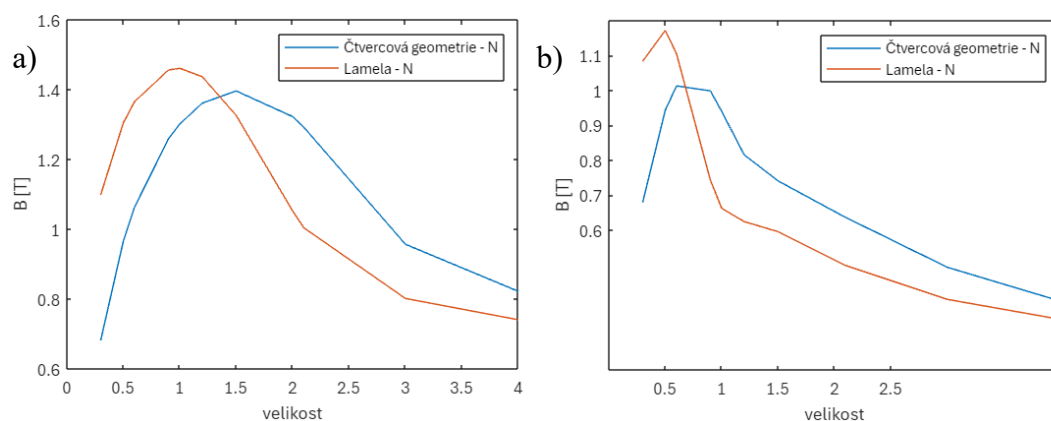
Obrázek 51 Vliv frekvence na magnetickou indukci a) při velikosti 0,5 mm b) při velikosti 1,2 mm



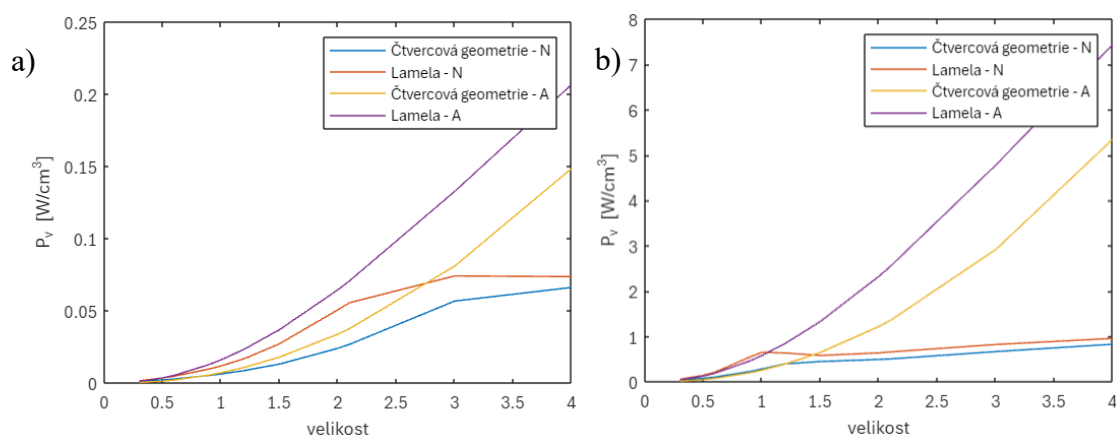
Obrázek 52 Vliv frekvence na vířivé ztráty a) při velikosti 0,5 mm b) při velikosti 1,2 mm

5.5.2 Vliv velikosti

Vliv velikosti lamely a čtvercové geometrie je znázorněn na grafech níže (obr. 53, 54). Pro vyšší frekvenci jsou křivky strmější. Analytické řešení kopíruje numerické hodnoty pouze zpočátku. Vliv tloušťky izolace je zahrnut.

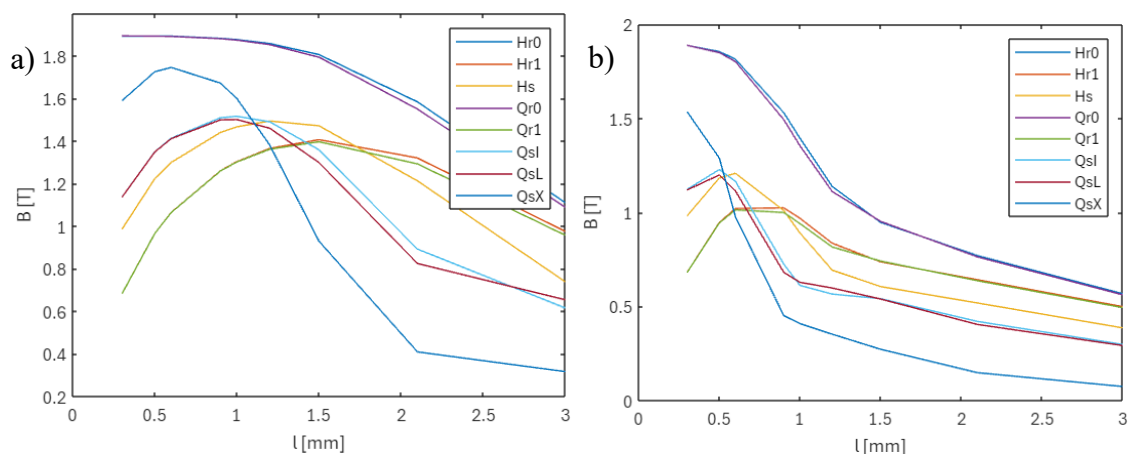


Obrázek 53 Vliv velikosti na magnetickou indukci a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz

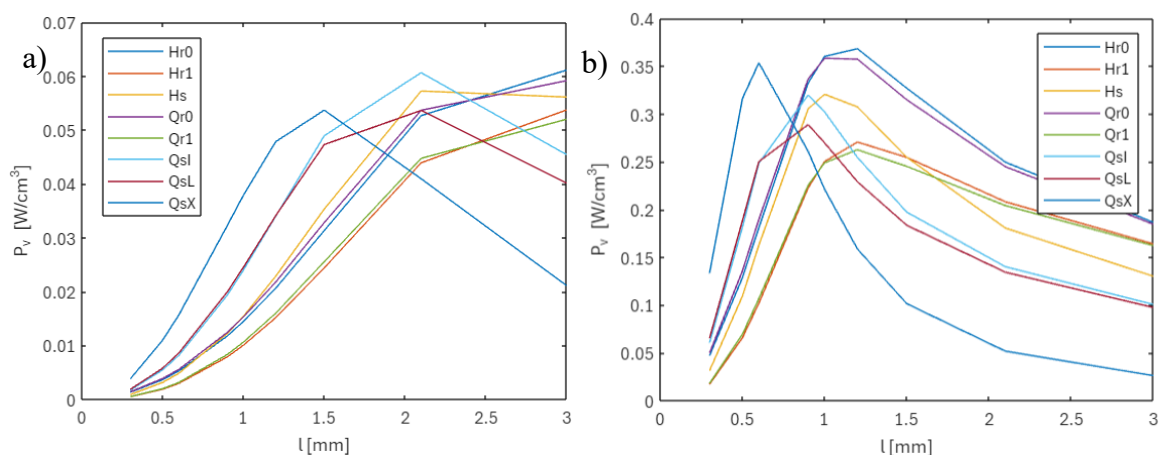


Obrázek 54 Vliv velikosti na vířivé ztráty a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz

Vliv velikosti elementů je patrný z grafů (obr. 55, 56), kdy každý tvar (je-li uvažována izolace) má pro každou frekvenci optimální velikost prvku, při které je dosaženo maximální magnetické indukce. Pro porovnání s vyšší frekvencí jsou grafy opět strmější a vrchol značící optimum pro daný tvar je posunut směrem k menší velikosti. Co se vířivých ztrát týče, ty jsou u vyšší frekvence mnohem vyšší, přesto malý element a vysoká frekvence může mít nižší vířivé ztráty než větší element při nízké frekvenci. Grafy níže budou rovněž využity pro popsání dalších vlivů.



Obrázek 55 Vliv velikosti na magnetickou indukci a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz



Obrázek 56 Vliv velikosti na vířivé ztráty a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz

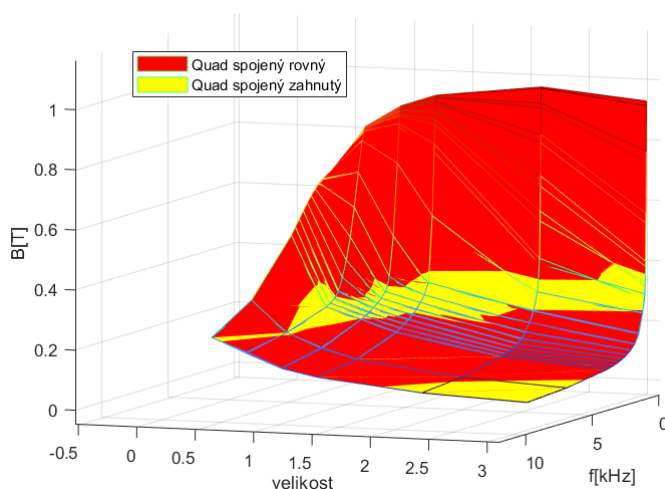
5.5.3 Vliv tvaru a propojení

Z hlediska porovnání magnetické indukce u lamely a čtvercového elementu se pro konkrétní velikost vyplatí při nižších frekvencích lamela, ale při vyšších frekvencích je lepší čtvercová geometrie. Pro konkrétní frekvenci se vyplatí buď tenká lamela, nebo větší čtvercová geometrie. Lamela má vrchol vždy výše, pouze se zužuje a posouvá doleva, takže potom naráží na limity tisku, popřípadě nemusí vyhovovat pro požadovaný frekvenční rozsah.

Z dříve uvedených grafů týkajících se elementů je patrné, že se více vyplatí samostatný šestiúhelníkový element než samostatný čtvercový element. U propojených elementů se při nižších frekvencích a menší velikosti elementu vyplácí propojit čtvercový element, ale jinak opět šestiúhelníkový element vykazuje lepší výsledky.

Se zvyšujícím se frekvencí, nebo velikostí jsou postupně výhodné tyto tvary: čtverec propojený, šestiúhelník propojený, šestiúhelník samostatný. Obě varianty spojení čtvercových elementů dosahují podobných hodnot. Kdy je který výhodnější, je zobrazeno na obr. 57 – většinou je pro testovaný rozsah a zejména nízké frekvence lepší rovný element. Čtverec samostatný se vyplatí pouze u frekvencí řádově kHz, u větších elementů, což bude způsobeno skin efektem. Hloubka vniku je malá, přičemž čtyřúhelník má vyšší poměr obvodu ku obsahu. Z toho plyne, že tvary, které byly označeny jako nevýhodné (obsahují totiž různé hrany zvyšující “průřez“ pro proud), by mohly být při velmi vysokých frekvencích naopak výhodnější. Rozdíl ve velikosti magnetické indukce mezi rozděleným šestiúhelníkem a čtyřúhelníkem však není (v rámci simulovaného rozsahu) významný, řádově [mT]. V tomto případě má důležitější vliv velikost daného elementu než jeho tvar. Samostatné elementy, není-li uvažována izolace, mají lepší rozložení ztrát, to dokládá pozvolnější pokles indukce, ale při uvažování fill faktoru mají nižší maximální dosaženou hodnotu průměrné indukce.

Obecně lze z grafů vyvodit, že důležitějším parametrem, než je tvar, je velikost a zda jsou elementy propojeny.



Obrázek 57 Porovnání rovného a zahnutého čtvercového elementu

5.5.4 Vliv izolace

Izolace má pozitivní dopad na ztráty, ale negativní na indukční tok v magnetickém obvodu. Její vliv odpovídá koeficientu, který je v modelovém ideálním případě dán poměrem:

$$k = S_{bez izolace} / S_{s izolací}$$

Je zřejmé, že vlivem izolace se jednotlivé křivky změní (předvídatelným způsobem). Zároveň je třeba poznamenat, že u různých struktur má izolace různý vliv. Např. u čtvercového elementu má izolace na výsledek větší vliv než u lamely. Lamela má totiž z principu vyšší fill faktor.

Vliv izolace samostatných elementů je poměrně přímočarý. Nebude-li zohledněna izolace, pak ztráty i magnetická indukce jsou při frekvenci blízké 0 Hz pro jakýkoliv tvar shodné. Zohlední-li se izolace, bude výsledná hodnota ku původní v poměru obsahů $S_{iz1}:S_{iz0}$. Z toho plyne, že fill faktor, o který se zde vlastně jedná, má zásadní vliv na výslednou hodnotu a nelze ho zanedbat! Izolace má tloušťku 0,1 mm pro každý element, což odpovídá 0,2 mm celkové tloušťky. Tato hodnota je vybrána s ohledem na aditivní technologii výroby.

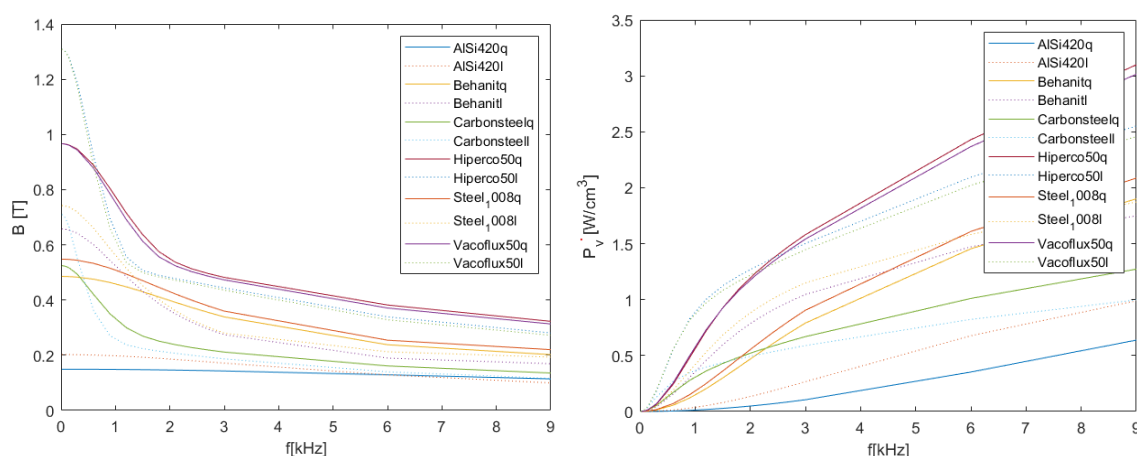
Pro propojené elementy nebyl vliv izolace přímo počítán, navíc je zde totiž člen propojující elementy. Získání dat by vyžadovalo nové simulace, ideálně pak i pro různé tloušťky izolace. Z hlediska pochopení vlivu izolace jsou výsledky samostatných elementů postačující.

Zohlednění tloušťky izolace má pozitivní vliv na omezení vířivých proudů, ale negativní na magnetickou indukci.

Cílem je, aby bylo rozložení magnetické indukce a ztrát co nejrovnoměrnější a užitého materiálu co nejvíce. Proto je fill faktor důležitým parametrem a měl by být co nejvyšší. Samozřejmě s ohledem na ztráty a výsledný indukční tok.

5.5.5 Vliv materiálu

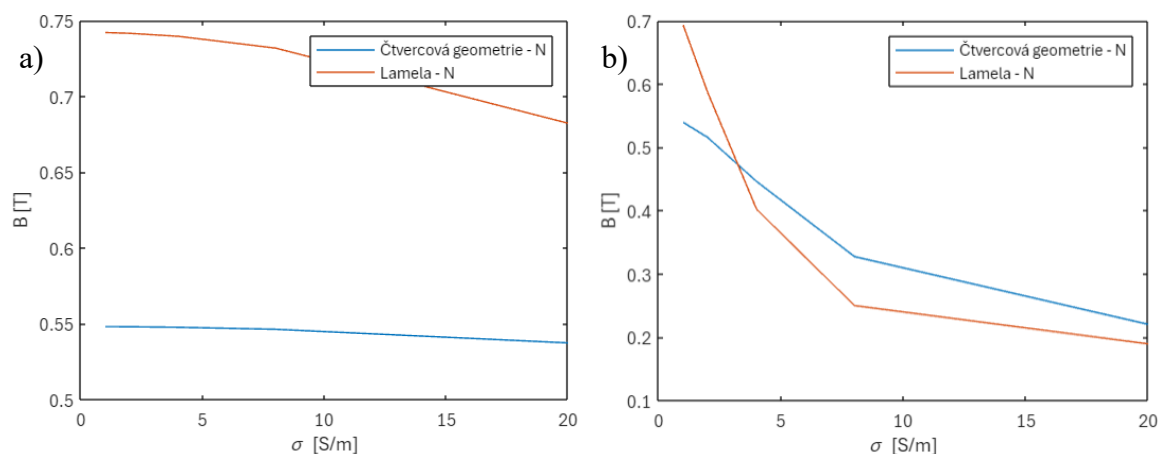
Materiál má velký vliv na výslednou indukci. Nejvyšší ztráty železo-kobaltové slitiny Vacoflux50 nebo Hiperco50 (obr. 58), odpovídají vysoké efektivní permeabilitě materiálu. Vliv tvaru je pro zvolené podmínky zanedbatelný. Vliv byl testován na lamele a čtverci velikosti 0,5 mm.



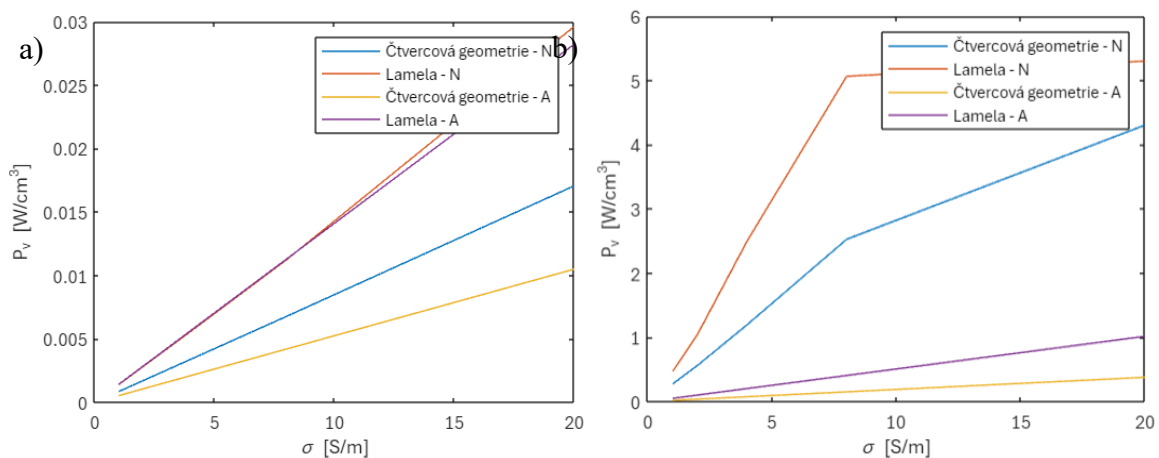
Obrázek 58 Vliv materiálu

5.5.6 Vliv vodivosti

Pro test vodivosti (obr. 59, 60) byl vybrán charakteristický rozměr 0,5 mm. Vliv vodivosti na ztráty je v analytickém řešení lineární. Při nižších frekvencích se numerické řešení ztrát od analytického trochu liší, ale při vyšších frekvencích rychlost růstu u numerické řešení klesá se zvyšující se vodivostí. Při frekvenci 50 Hz zůstává lamela výhodnější, ale při frekvenci 300 Hz je možné pozorovat, že zvýšení vodivosti může výhodnost tvaru změnit.



Obrázek 59 Vliv vodivosti na magnetickou indukci a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz

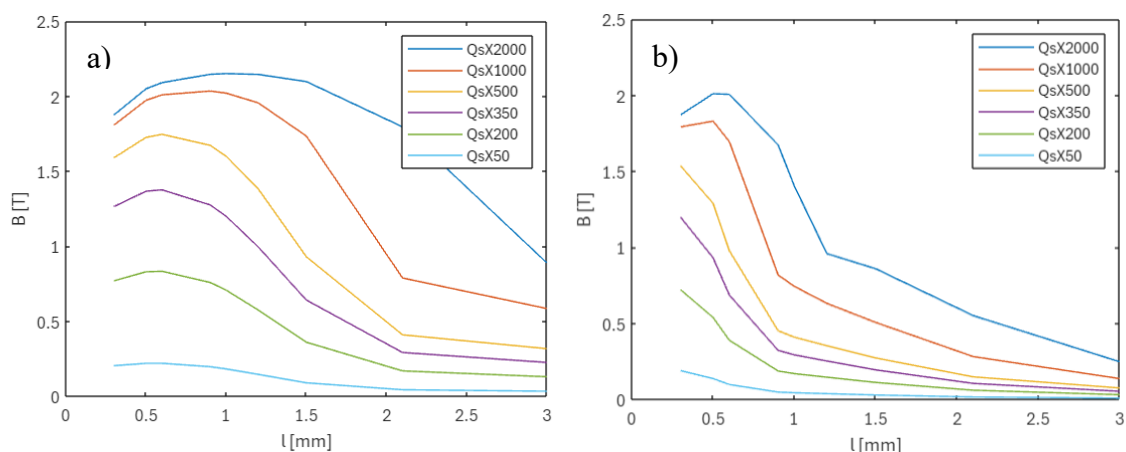


Obrázek 60 Vliv vodivosti na ztráty a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz

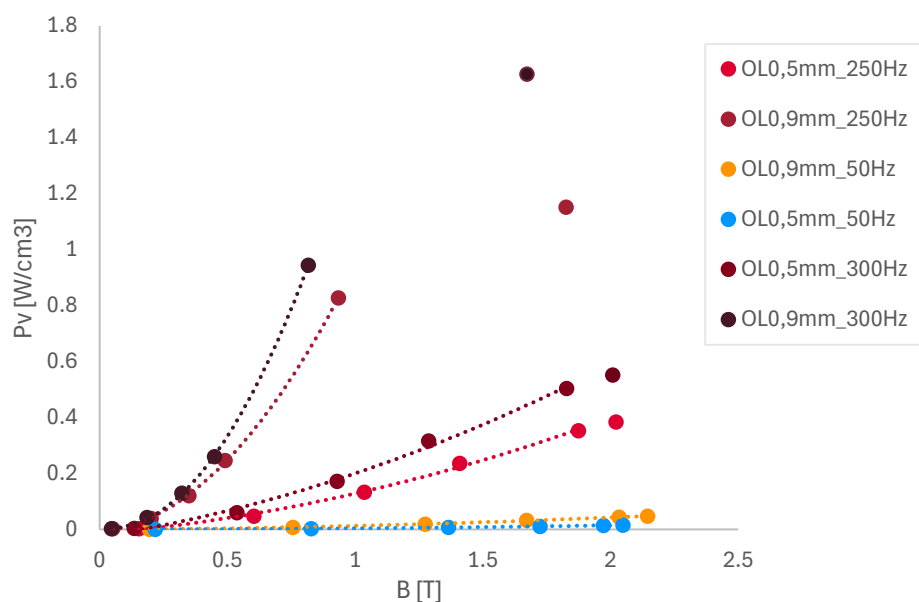
5.5.7 Vliv magnetické indukce a intenzity

Pro vybranou strukturu byly kromě původní $H = 500 \text{ A/m}$ otestovány i další hodnoty: $\{50; 200; 350; (500); 1000; 2000\}$. Z porovnání výsledků vyplývá, že se zvyšujícím se H se velikost, při níž je dosažena maximální hodnota průměrného B se posunuje mírně doprava, posun se zvyšuje při dosažení saturace (obr. 61).

Podle běžně užívaných vzorců závisí ztráty na B s druhou mocninou. To potvrzují i získaná data (obr. 62). V oblasti saturace pak při zvyšování B je patrný pokles růstu ztrát.



Obrázek 61 Průměrná magnetická indukce v závislosti na velikosti, při různé intenzitě magnetického pole a frekvenci a) 50 Hz b) 300Hz



Obrázek 62 Graf závislosti $P_v(B)$

6 DETAILNÍ NÁVRH

Detailní návrh se zabývá metodikou a aplikací struktur na toroid a jejich vyhodnocením.

6.1 Aplikace struktury

Kromě struktury QsX, která vyšla nejlépe (kap.5.3), byly vybrány pro porovnání toroidů i šestiúhelníkové elementy spojený a samostatný. U těchto vybraných struktur bylo třeba zvolit vhodnou velikost pro zvolený frekvenční rozsah. Na základě metody popsané v kapitole 4.8 byla vybrána každému elementu optimální velikost. Podle navrženého postupu (kapitola 4.10) byl optimální element v prvním kroku aplikován na toroid a v druhém kroku pak došlo k optimalizaci struktury. V tabulce 9 jsou všechny velikosti shrnuty. Samotný návrh struktury toroidů se řídil zejména technologickými možnostmi a omezeními 3D tisku. Navržené a testované struktury toroidů jsou vidět na obr. 63 až 67 níže.

Značení toroidů odpovídá schématu T + *struktura* (+ číslo u optimalizace). Pro porovnání je přidán plný toroid (Tp).

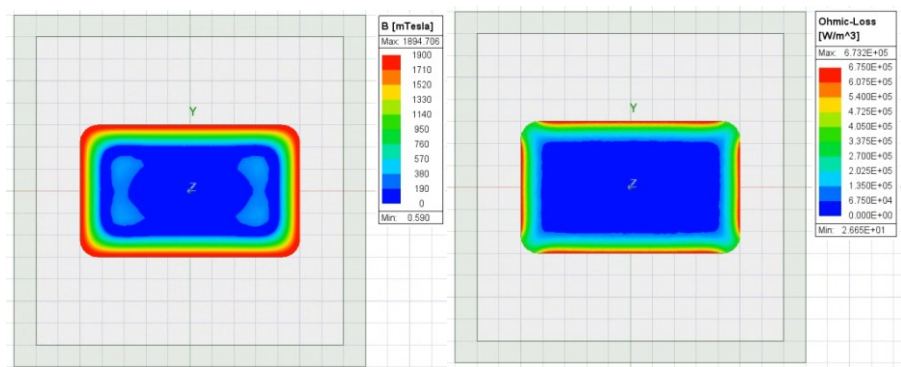
Z výsledků (obr. 68, 69, 70) je patrné, že šestiúhelníkové elementy aplikované na toroid vychází mnohem lépe než bylo předpokládáno. To je pravděpodobně způsobeno tenkými propojeními. Zároveň je nutné podotknout, že čtyřúhelníková struktura stále vyšla nejlépe. Její optimalizovaná varianta však výsledek nezlepšila. Zároveň platí, že jakákoliv struktura je výrazně lepší než plný materiál.

V porovnání s experimentem (kap. 5.2) jsou ztráty numerického modelu řádově 10x nižší. Odchylka může být způsobena několika faktory:

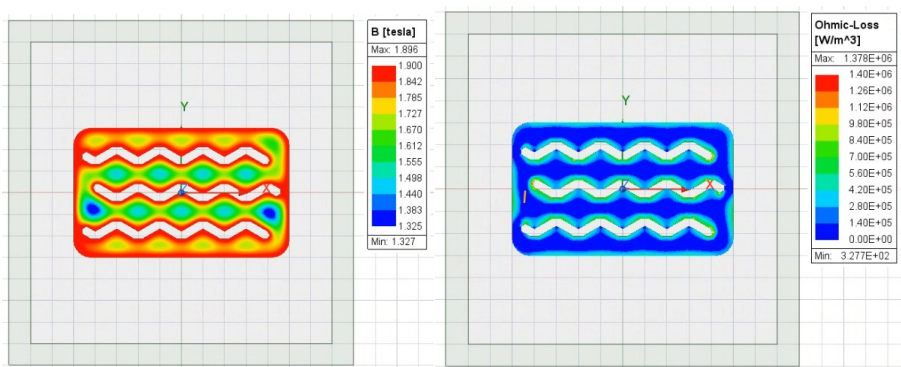
1. Rozdílnost materiálového modelu oproti reálnému materiálu.
2. Ideální vakuová izolace modelu a neideální tištěného vzorku.
3. Výpočet vířivých ztrát z experimentu neuvažuje dodatečné ztráty.
4. Výrobní nedokonalosti, odchylka geometrie od modelu.

Tabulka 9 Vybrané, aplikované a optimalizované velikost elementů

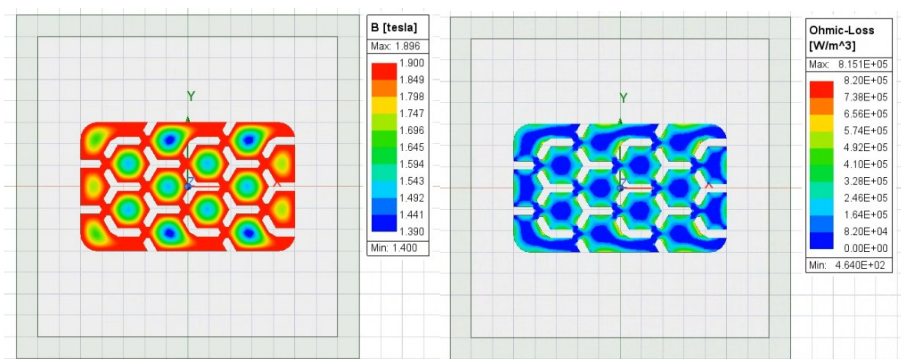
Velikost elementu						
element:	Hs	Hr	Qr	Xsl	QsL	QsX
vybraná velikost elementu:	0,8	1	1	0,65	0,6	0,4
aplikovaná velikost:	0,781	1	-	-	-	0,4
optimalizovaná velikost:	0,8	0,867	-	-	-	0,4



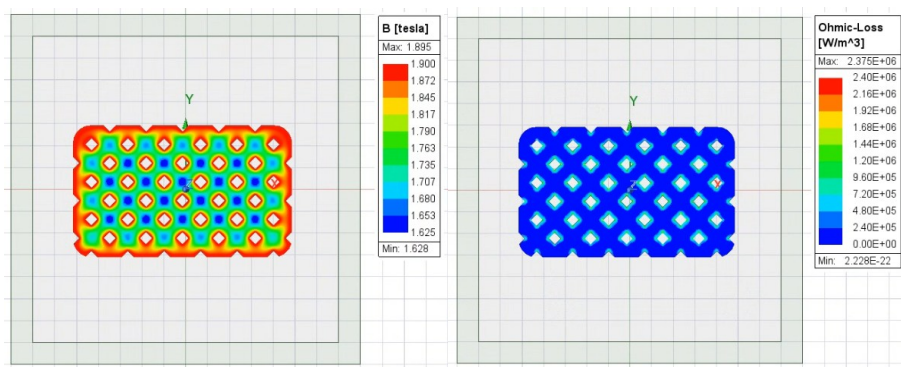
Obrázek 63 Struktura Tp



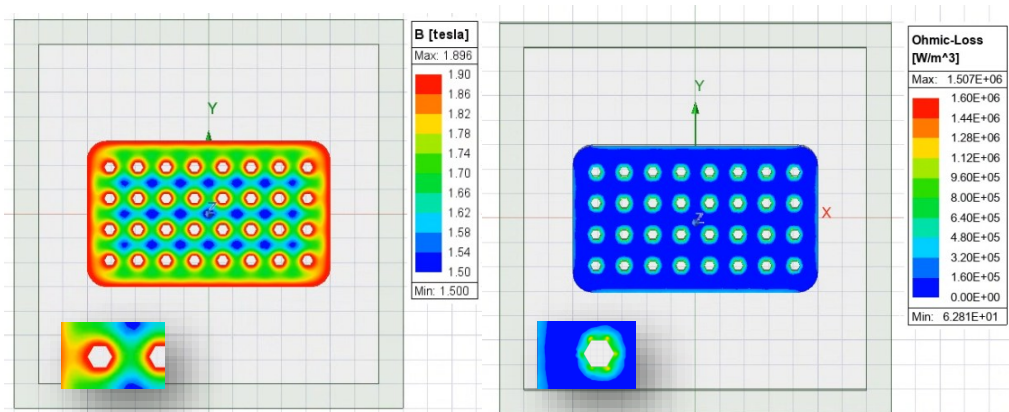
Obrázek 64 Struktura THs2



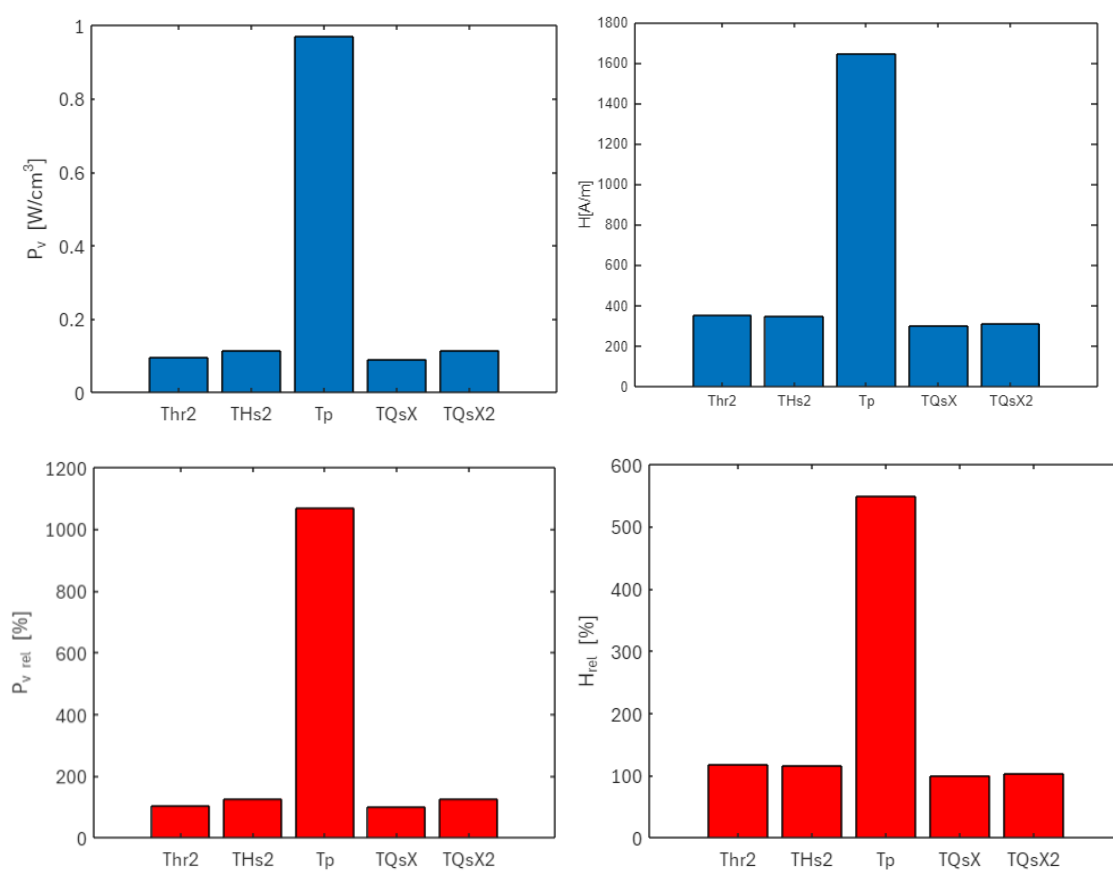
Obrázek 65 Struktura Thr2



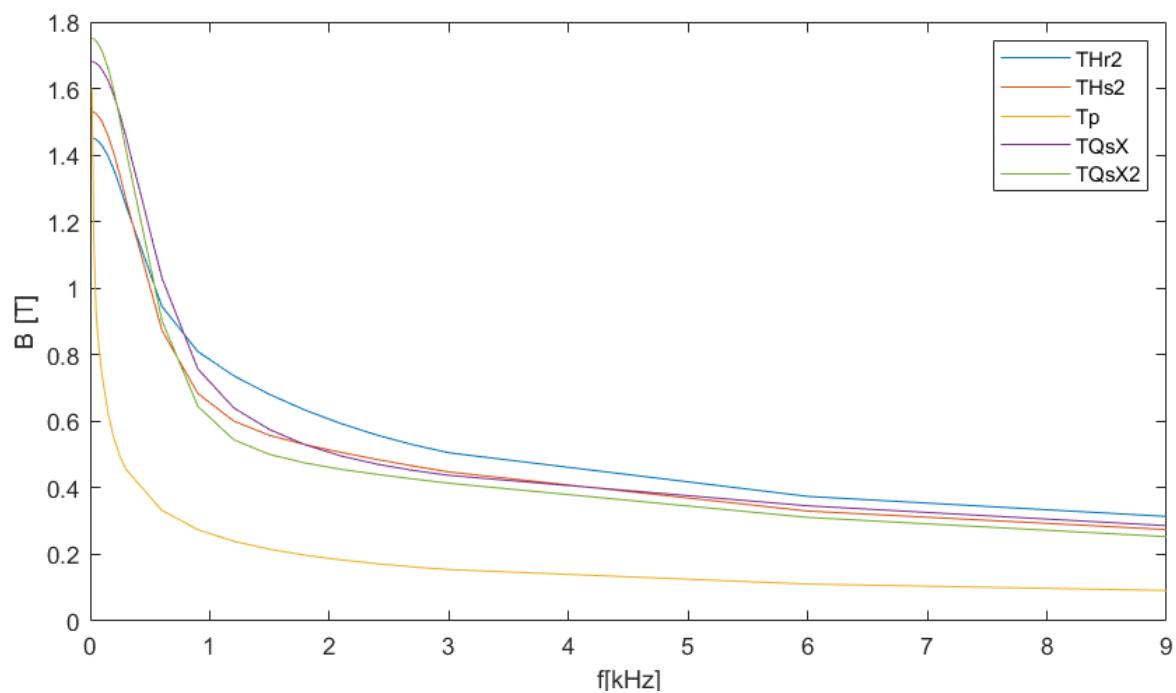
Obrázek 66 Struktura TQsX



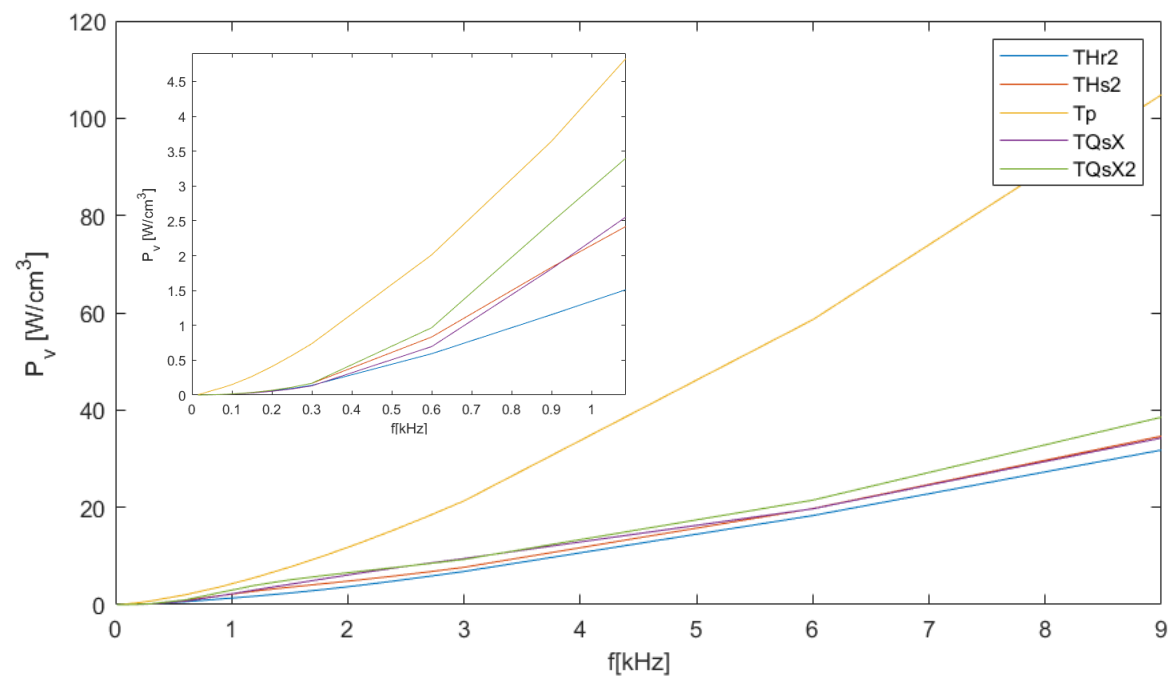
Obrázek 67 Struktura TQsX2



Obrázek 68 Vířivé ztráty a intenzita magnetického pole při $B = 1 \text{ T}$, $f = 250 \text{ Hz}$.



Obrázek 69 Graf frekvenční závislosti magnetické indukce toroidů



Obrázek 70 Závislost $P_v(f)$ při $B = 1$ T pro navržené struktury toroidů

6.2 Metodika

Proces návrhu výhodné struktury by měl být následovný:

1. Vymezení aplikace
2. Vymezení možností výroby
3. Test elementů (s odpovídajícím materiálovým modelem) a získání optimálního tvaru
4. Aplikace tvaru na obvod
5. Optimalizace pro tisk

Z testování vlivů a struktur byly získány poznatky, které je důležité vzít v potaz při návrhu teoreticky výhodné geometrie.

- 1) Cílem je získat co nejrovnoměrnější rozložení magnetické indukce.
- 2) S větší velikostí struktury klesá $B_{\text{průměrná_bez_izolace}}$, ale roste fill faktor. Toto jsou dva protichůdné principy, které je třeba vyvážit, protože mají dopad na $B_{\text{průměrná_s_izolací}}$.
- 3) Nejvýhodnější strukturu nelze určit bez vymezení vnějších podmínek a cílové hodnoty průměrné magnetické indukce.
- 4) Efektivní permeabilita (Měření B při konst. H) se jeví jako vhodné optimalizační kritérium, přestože nemusí vést na globálně nejvýhodnější strukturu pro daný frekvenční rozsah. Umožňuje relativně rychle otestovat a vytipovat vhodné struktury.
- 5) Přestože některé struktury dosahují při jednotlivých frekvencích lepších hodnot efektivní permeability, pro rozsah frekvencí už vlivem posunu vrcholu může být vhodnější zvolit strukturu s nižší max. efektivní permeabilitou, která není tak strmá a lépe pokryje frekvenční rozsah.
- 6) Velikost struktury má větší vliv než její tvar.
- 7) Nejvhodnějším tvarem jsou plné struktury s póry v rovině vířivých proudů a plným materiálem ve směru Φ , dále pak SFC křivky a potom rozdělené elementy. S rostoucí frekvencí klesá i velikost pro dosažení vrcholu a grafy jsou strmější. Pokud by nebyla uvažována izolace pak by výhodnost struktur byla naopak z důvodu velikosti pracovní oblasti, zřejmě mají lépe rozloženou indukci. Jediné co je znevýhodňuje je nižší fill faktor. **Fill faktor má zásadní vliv na výhodnost struktur.** (Vždy je důležité zvolit správnou velikost.)
- 8) Se zvyšujícím se H se velikost, při níž je dosažena maximální hodnota průměrného B se posunuje mírně doprava, posun se zvyšuje při dosažení saturace.
- 9) Předpokládejme nějakou strukturu s vyšší B než je potřeba. Jsou zde dvě možné varianty, jak snížit B a tím snížit ztráty:
 - a) Zmenšit velikost prvku (je-li to ještě možné)
 - b) Snížit H

Varianta a) snižuje zejména vířivé ztráty se druhou mocninou a také hysterezní ztráty vlivem snížení fill faktoru. Varianta b) má obdobně pozitivní dopad na obě ztráty, přičemž výhoda tohoto způsobu je, že se ztráty omezují generálně, nikoliv změnou struktury. Vzhledem k vyššímu fill faktoru u metody b), lze rovněž předpokládat i vyšší efektivitu pro výhodnější rozložení indukce B . Metoda b) je tedy jednoznačně preferována, ale v případě potřeby je možno využít i metodu a).

- 10) Velikost struktury by se rovněž mohla dát odhadnout z hloubky vniku. Bude-li předpokládat, že je zapotřebí co nejvíce zahustit proudové smyčky, pak charakteristický rozměr by měl být $l < 2\delta$ se zohledněním fill faktoru, který s klesajícím l klesá. Konkrétní hloubka skinefektu pro použitý materiál v numerických simulacích viz tabulka 10.

Tabulka 10 Hloubka skinefektu v závislosti na frekvenci

f [Hz]	hloubka skinefektu [mm]
15	1,16
30	0,82
50	0,63
75	0,52
100	0,45
150	0,37
200	0,32
250	0,29
300	0,26

Samotný návrh geometrie toroidů se řídil technologickými možnostmi a omezeními 3D tisku (kap.4.3) a také těmito zásadami:

- 1) Element je aplikován kolmo na magnetickou indukci
- 2) Zvolený element z pravidla nevyplní přesně celý magnetický obvod, je tedy vhodné upravit jeho velikost, popřípadě jej protáhnout, nebo zúžit. Kritické jsou v tomto ohledu okrajové oblasti. Je třeba jej upravit s ohledem na velikost struktury a na tisknutelnost.
- 3) Zvýší-li se zmenšením elementu plnicí faktor zvoleného magnetického obvodu, je vždy výhodné to udělat.

- 4) Vzhledem k zvýšení strmosti grafů při zvolení lepšího materiálu než je u materiálu v numerickém modelu lze předpokládat, že je výhodnější zvolit radši menší velikost, než je v modelu. V opačném případě naopak je lépe zvolit větší prvky.
- 5) V neposlední řadě je třeba zvážit při návrhu struktury i mechanické vlastnosti nového obvodu.

Z experimentální části plyne:

- 1) Při měření má zásadní vliv kvalita budicího proudu, zejména pak symetrie.
- 2) Při zpracování dat má důležitou roli zarovnání smyčky, malá změna zarovnání může vést na velkou změnu výsledné hodnoty (např. koercivita). Pro správné zarovnání je zapotřebí dostatečně vysoká vzorkovací frekvence.
- 3) Tepelné zpracování, které proběhlo má velmi pozitivní vliv na vlastnosti magnetického obvodu.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo vyvinout strukturu pro aditivně vyráběný magnetický obvod ve tvaru toroidu za účelem omezení vířivých ztrát v magnetickém obvodu. Dále byly specifikovány podmínky, které obvod musí splnit. Vyroben byl i vzorek toroidu pomocí PBF-LB z FeCo prášku. Tato vývojová práce by měla přispět k budoucímu zlepšení vlastností magnetických obvodů.

Součástí bylo sestavení magnetického modelu umožňující výpočet ztrát vířivými proudy, stanovení vlivu geometrie struktury, excitační frekvence, velikosti magnetické indukce a materiálu na ztráty. Dále pak návrh teoreticky výhodné geometrie struktury, aplikace struktury na magnetický obvod ve tvaru toroidu, výroba vzorku a sestavení měřicího řetězce pro vyhodnocení ztrát.

V úvodní části práce byla provedena rešerše problematiky magnetických obvodů z hlediska ztrát, bylo pojednáno krátce o materiálech pro magnetické obvody a hlavně byly zmíněny nejdůležitější články a stav poznání v oblasti 3D tisku magnetických obvodů. V nalezených článcích byly analyzovány především struktury typu Space Filling Curves, laminované struktury a další přístupy, které využívají segmentaci pro redukci vířivých ztrát.

Z rešerše vyplynulo, že optimální magnetický obvod je charakteristický tím, že dosahuje požadované hodnoty magnetického indukčního toku při minimálních ztrátách. Výběr struktury pak je závislý na podmínkách, pro které je navržen. Lze konstatovat, že v žádném z výše uvedených článků není odůvodněno, proč byly vybrány struktury, které byly vybrány a proč mají velikost jakou mají. Zatím nebyl nalezen ani článek s postupem návrhu struktury a popisem vlivu parametrů návrhu na efektivitu daného obvodu.

Proto v rámci koncepčního řešení byla na základě rešerše a technologických omezení navržena metoda testování a rozvržen celý postup. Klíčovou je metoda elementů, která spočívá nikoliv v testování celé struktury, ale pouze v testování elementu struktury. Testovány byly čtvercový a šestiúhelníkový element v různých variantách vzájemného propojení o různých velikostech a při různých frekvencích. Kritériem pro výběr struktury byla maximální magnetická indukce při konstantní amplitudě buzení. Test probíhal na vytvořeném numerickém modelu, který je zaměřen na vyhodnocení vířivých ztrát. Všechny zvolené elementy jsou dále vyhodnoceny v rámci předběžného návrhu a je stručně popsán vliv a význam frekvence, velikosti, izolace (fill faktoru), tvaru a propojení, materiálu a magnetické indukce.

Pro budoucí vývoj struktur byl proveden první předběžný PBF-LB tisk plného a dvou strukturovaných toroidů z FeCo, pro které byl posléze sestaven měřicí řetězec, na němž byly vyhodnoceny vlastnosti toroidů před a po tepelném zpracování. Tepelné zpracování výrazně zlepšilo magnetické vlastnosti toroidů.

Detailní návrh pak obsahuje výsledné struktury toroidů, navržené na základě aplikace výhodných elementů a metodiku, která byla zpracována.

Z numerických simulací nejlépe vyšel čtvercový křížový element. Ten byl spolu se šestiúhelníkovým spojeným rovným a samostatným aplikován na toroid. Po aplikaci byly rozdíly ve výhodnosti menší, přesto čtvercový křížový dosahoval nejlepších hodnot ztrát při $B = 1 \text{ T}$ a pro frekvenční rozsah do 300 Hz.

Pro návrh struktury má na ztráty zásadní vliv zejména materiál, velikost struktury a fill faktor. Tvar a propojení mají podružnou roli.

V rámci práce byly splněny všechny požadované cíle.

- ✓ Sestavení magnetického modelu umožňujícího vypočítat ztráty vířivými proudy
- ✓ Stanovení vlivu geometrie struktury, excitační frekvence, velikosti magnetické indukce a materiálu na ztráty
- ✓ Návrh geometrie struktury a její aplikace na magnetický obvod ve tvaru toroidu
- ✓ Výroba vzorku a experimentální stanovení ztrát.

Oproti zadání byla navíc navržena metoda elementů sloužící pro návrh geometrie a byla sepsána metodika návrhu. Kromě toho byl ještě otestován vliv tepelného zpracování.

V blízké budoucnosti bude potřeba navázat na tuto práci například v těchto bodech:

- Optimalizace tiskových parametrů
- Test a optimalizace mechanických vlastností
- Tvorba materiálového modelu
- Tvorba numerického modelu zohledňujícího všechny typy ztrát.
- Tisk nových struktur
- Otestování struktury HsX a rozšíření rozsahu velikostí (také pro QsX), aby byly vidět celé křivky alespoň $\{0,1; 0,2\}$.

Kromě blízkých cílů je vhodné zmínit i dlouhodobější vize. Příležitostí a výzvou pro oblast 3D tisku magnetických obvodů je výzkum a vývoj v těchto oblastech:

- Tvorba orientovaných mikrotrhlin/strukturované porozity dle zjištěných zásad
- Řízení orientace mikrostruktury
- Tvorba topologické optimalizace struktury
- Aplikace struktury na elektromotor a jeho výroba
- Multimateriálový tisk magnetických obvodů

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KLEIN, Carsten, Christopher MAY a Matthias NIENHAUS. Magnetic Performance of Eddy Current Suppressing Structures in Additive Manufacturing. *Actuators* [online]. MDPI, 2024, 2024-2-28, **13**(3), 94 [cit. 2025-12-23]. ISSN 2076-0825. Dostupné z: doi:10.3390/act13030094
- [2] URBAN, Nikolaus, Michael MASUCH, Jan PADUCH a Jörg FRANKE. An Approach to Eddy Current Reduction in Laser Powder Bed Fused High Silicon Steel Considering Manufacturing Influences. In: *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)* [online]. IEEE, 2021, 2021-12-7, s. 1-5 [cit. 2025-12-23]. Dostupné z: doi:10.1109/edpc53547.2021.9684214
- [3] PLOTKOWSKI, A., K. CARVER, F. LIST, J. PRIES, Z. LI, A. Marques ROSSY a D. LEONARD. Design and performance of an additively manufactured high-Si transformer core. *Materials & Design* [online]. Elsevier BV, 2020, **194**, 108894 [cit. 2025-12-23]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2020.108894
- [4] PLOTKOWSKI, A., J. PRIES, F. LIST, P. NANDWANA, B. STUMP, K. CARVER a R.R. DEHOFF. Influence of scan pattern and geometry on the microstructure and soft-magnetic performance of additively manufactured Fe-Si. *Additive Manufacturing* [online]. Elsevier BV, 2019, **29**, 100781 [cit. 2025-12-23]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.100781
- [5] GOODALL, Alexander D., Georgios YIANNAKOU, Lova CHECHIK, Ria L. MITCHELL, Geraint W JEWELL a Iain TODD. Geometrical control of eddy currents in additively manufactured Fe-Si. *Materials & Design* [online]. Elsevier BV, 2023, **230**, 112002 [cit. 2025-12-23]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2023.112002
- [6] GOODALL, Alexander D., Lova CHECHIK, Ria L. MITCHELL, Geraint W. JEWELL a Iain TODD. Cracking of soft magnetic FeSi to reduce eddy current losses in stator cores. *Additive Manufacturing* [online]. Elsevier BV, 2023, **70**, 103555 [cit. 2025-12-23]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2023.103555

- [7] GOODALL, Alexander D., FNU NISHANTH, Eric L. SEVERSON a Iain TODD. Loss performance of an additively manufactured axial flux machine stator with an eddy-current limiting structure. *Materials Today Communications* [online]. Elsevier BV, 2023, **35**, 105978 [cit. 2025-12-23]. ISSN 2352-4928. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtcomm.2023.105978

- [8] GADIYAR, Nishanth, Alexander D. GOODALL, Iain TODD a Eric L. SEVERSON. Characterization of an Axial Flux Machine With an Additively Manufactured Stator. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2023, **38**(4), 2717-2729 [cit. 2025-12-23]. ISSN 0885-8969. Dostupné z: doi:10.1109/tec.2023.3285539

- [9] STRECKER, Zbyněk, Michal KUBÍK, Petr VÍTEK, Jakub ROUPEC, David PALOUŠEK a Vít ŠREIBR. Structured magnetic circuit for magnetorheological damper made by selective laser melting technology. *Smart Materials and Structures* [online]. IOP Publishing, 2019, 2019-4-5, **28**(5), 055016 [cit. 2025-12-23]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/1361-665x/ab0b8e

- [10] STRECKER, Zbyněk, Filip JENIŠ, Michal KUBÍK, Ondřej MACHÁČEK a Seung-Bok CHOI. Novel Approaches to the Design of an Ultra-Fast Magnetorheological Valve for Semi-Active Control. *Materials* [online]. MDPI, 2021, 2021-5-12, **14**(10), 2500 [cit. 2025-12-23]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14102500

- [11] GOLL, D., D. SCHULLER, G. MARTINEK, et al. Additive manufacturing of soft magnetic materials and components. *Additive Manufacturing* [online]. Elsevier BV, 2019, **27**, 428-439 [cit. 2025-12-23]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.02.021

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam použitých zkratek

<i>AM</i>	Additive manufacturing (aditivní výroba)
<i>HEA</i>	High Entropy Alloy (vysokoentropická slitina)
<i>PBF</i>	Powder Bed Fusion (práškové lože)
<i>PBF-LB</i>	Powder Bed Fusion – Laser Beam (práškové lože – laserový paprsek)
<i>PBF-EB</i>	Powder Bed Fusion – Electron Beam (práškové lože – elektronový paprsek)
<i>SFC</i>	Space Filling Curves (křivky vyplňující prostor)
<i>SMC</i>	Soft Magnetic Composite (Magneticky měkký kompozit)
<i>TZ</i>	Tepelné zpracování

9.2 Seznam použitých fyzikálních veličin

B	Magnetická indukce
f	Frekvence
H	Intenzita magnetického pole
I	Elektrický proud
J	Proudová hustota
K_e	Koeficient vířivých ztrát
K_h	Koeficient hysterezních ztrát
l	Charakteristická velikost elementu
l	Efektivní délka cívky
N	Počet závitů vinutí
P_{add}	Dodatečné/přídavné ztráty
P_e	Ztráty vířivými proudy
P_h	Hysterezní ztráty
P_v	Ztráty vířivými proudy
P_{tot}	Celkové ztráty
S	Průřez toroidu
t	Teplota
t	Čas
U	Napětí
V	Objem
δ	Hloubka vniku
μ	Permeabilita
μ_r	Relativní permeabilita
ρ	Měrný elektrický odpor
σ	Elektrická vodivost
ω	Úhlová frekvence

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 1 a) příklad SFC křivek b) tři úrovně Hilbertovy a peanovy křivky c) numerický model d) ukázka výsledků simulací.....	21
Obrázek 2 a) Numerický model b) Testované křivky c) Testování toroidního jádra	22
Obrázek 3 a) model struktury, b) vytištěný strukturovaný obvod c) numerický model - magnetická indukce, d) numerický model – proudová hustota.....	23
Obrázek 4 a) strategie skenování b) vytištěné vzorky struktur	24
Obrázek 5 a) model pro numerickou simulaci b) Výsledek testování struktur c) grafický abstrakt shrnující článek [7].....	25
Obrázek 6 a) numerický model b) porovnání modelu a reálné struktury c) Vytištěný vzorek a výsledek numerické simulace.....	26
Obrázek 7 a) Princip omezení proudu v materiálu b) Detail porovnávaných struktur - Hilbertova křivka a mikrotrhlina.....	26
Obrázek 8 Schéma práce	31
Obrázek 9 Schéma metody elementů	35
Obrázek 10 Grafy s rozsahem akceptovatelných velikostí. Pro strukturu QsX nebylo možné získat všechna data, proto byla velikost zvolena nejen na základě výsledků ale i s ohledem na tisknutelnost.	37
Obrázek 11 Popis geometrie importované do numerické simulace	40
Obrázek 12 Okrajové podmínky	41
Obrázek 13 Nastavení materiálu.	41
Obrázek 14 Set up simulace.	42
Obrázek 15 Vliv frekvence na vířivé ztráty a) při velikosti 0,3 mm b) při velikosti 1,2 mm	43
Obrázek 16 Vliv velikosti na vířivé ztráty a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz	44
Obrázek 17 Měřicí řetězec pro získání BH smyčky	46
Obrázek 18 Toroid A: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 1$ Hz.	48
Obrázek 19 a) Tisková platforma s tisknutými toroidy a vzorky. b) Šestiúhelníková struktura toroidů připravená pro tisk (izolace 0,1 mm nahoře, izolace 0,2 mm dole). Materiál v dolní části odpovídá tloušťce potřebné pro odřez od platformy.	49
Obrázek 20 Tepelné zpracování toroidů.....	49

Obrázek 21 Toroid FeCo Plný: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 1$ Hz.	50
Obrázek 22 Toroid H0,6_0,1: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 1$ Hz.	51
Obrázek 23 Toroid H0,6_0,2 a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 1$ Hz.	51
Obrázek 24 Toroid FeCo Plný: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 0,1$ Hz.	51
Obrázek 25 Toroid H0,6_0,1: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 0,1$ Hz.	52
Obrázek 26 Toroid H0,6_0,2: a) BH smyčka s panenskou křivkou a b) závislost permeability na H při $f = 0,1$ Hz.	52
Obrázek 27 Toroid A: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B=1$ T. Původní konvenční vzorek.	53
Obrázek 28 Toroid H0,6_0,1: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 1$ T. Před TZ.	53
Obrázek 29 Toroid H0,6_0,2: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 1$ T. Před TZ.	53
Obrázek 30 Toroid FeCo Plný: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 1$ T. Po TZ.	54
Obrázek 31 Toroid H0,6_0,1: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 1$ T. Hz.	54
Obrázek 32 Toroid H0,6_0,2: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 1$ T. Po TZ.	54
Obrázek 33 Toroid FeCo Plný: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 0,3$ T. Před TZ.	55
Obrázek 34 Toroid H0,6_0,1: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 0,3$ T. Před TZ.	55
Obrázek 35 Toroid H0,6_0,2: a) plocha smyčky a b) ztráty pro $B = 0,3$ T. Před TZ.	55
Obrázek 36 Čtverec spojený kříž (QsX)	56
Obrázek 37 Závislost $B(l)$ při frekvenci 200 Hz.	56
Obrázek 38 a) porovnání potřebné H pro dosažení $B=1$ T, b) porovnání vířivých ztrát při $B=1$ T.	57
Obrázek 39 Závislost $B(f)$ pro vyvinuté elementy do 9kHz.	57
Obrázek 40 Závislost P_v na frekvenci při konst. B a) absolutní, b) relativní vůči QsX	58
Obrázek 41 Šestiúhelník (Hex_samostatný/Hr)	58
Obrázek 42 Šestiúhelník spojený (Hex_spojený/Hs)	59
Obrázek 43 Čtverec samostatný (Quad_samostatný/QR)	59
Obrázek 44 Čtverec spojený zahnutý (Quad_spojený_zahnutý/QsL)	59

Obrázek 45 Čtverec spojený rovný (Quad_spojený_rovný/QsI)	60
Obrázek 46 Čtverec spojený kříž (QsX).....	60
Obrázek 47 Lamela (Lam)	60
Obrázek 48 Graf porovnání elementů B(f,l)	61
Obrázek 49 Vliv frekvence na magnetickou indukci a) při velikosti 0,3 mm b) při velikosti 1,2 mm	62
Obrázek 50 Vliv frekvence na vířivé ztráty a) při velikosti 0,3 mm b) při velikosti 1,2 mm	62
Obrázek 51 Vliv frekvence na magnetickou indukci a) při velikosti 0,5 mm b) při velikosti 1,2 mm	62
Obrázek 52 Vliv frekvence na vířivé ztráty a) při velikosti 0,5 mm b) při velikosti 1,2 mm	63
Obrázek 53 Vliv velikosti na magnetickou indukci a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz.....	63
Obrázek 54 Vliv velikosti na vířivé ztráty a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz.....	63
Obrázek 55 Vliv velikosti na magnetickou indukci a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz.....	64
Obrázek 56 Vliv velikosti na vířivé ztráty a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz.....	64
Obrázek 57 Porovnání rovného a zahnutého čtvercového elementu	65
Obrázek 58 Vliv materiálu	66
Obrázek 59 Vliv vodivosti na magnetickou indukci a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz.....	67
Obrázek 60 Vliv vodivosti na ztráty a) při frekvenci 50 Hz b) při frekvenci 300 Hz	67
Obrázek 61 Průměrná magnetická indukce v závislosti na velikosti, při různé intenzitě magnetického pole a frekvenci a) 50 Hz b) 300Hz	68
Obrázek 62 Graf závislosti $P_v(B)$	68
Obrázek 63 Struktura Tp.....	70
Obrázek 64 Struktura THs2.....	70
Obrázek 65 Struktura Thr2.....	70
Obrázek 66 Struktura TQsX.....	70
Obrázek 67 Struktura TQsX2	71
Obrázek 68 Vířivé ztráty a intenzita magnetického pole při $B = 1 \text{ T}$, $f = 250 \text{ Hz}$	71

Obrázek 69 Graf frekvenční závislosti magnetické indukce toroidů	72
Obrázek 70 Závislost $P_v(f)$ při $B = 1$ T pro navržené struktury toroidů	72

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rozdělení parametrů	32
Tabulka 2 Odchylka ztrát od přepočítaných ztrát	34
Tabulka 3 Úvodní simulace sloužící k porovnání s analytickým řešením a k testování vlivů parametrů	35
Tabulka 4 Koncepční návrh struktury, výběr elementů	36
Tabulka 5 Přehled konceptů elementů	36
Tabulka 6 Porovnání výsledků lamely a lamely tvořené elementy.	44
Tabulka 7 Porovnání měřené a referenční hodnoty u toroidu A	48
Tabulka 8 Počet navinutých závitů	50
Tabulka 9 Vybrané, aplikované a optimalizované velikost elementů.....	69
Tabulka 10 Hloubka skinefektu v závislosti na frekvenci.....	74

12 SEZNAM PŘÍLOH

Elektronická příloha 1 Setup měření v programu Dewesoft7 (V7.1)

- | | |
|-----------|------------------|
| – Soubor1 | A_Plny.d7s |
| – Soubor2 | FeCo_0_6_0_1.d7s |
| – Soubor3 | FeCo_0_6_0_2.d7s |
| – Soubor4 | FeCo_Plny.d7s |