

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

Ing. Tomáš Bulín

**ANALÝZA V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH PŘI
NESTANDARDNÍCH PODMÍNKÁCH**

**LOSSES ANALYSIS IN ELECTRIC MACHINES UNDER
SPECIAL CONDITIONS**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

BRNO 2019

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetismus; magnetické ztráty; hysterezní křivka; magnetické měření; toroidní vzorek; Epsteinův rám; synchronní reluktanční motor s permanentními magnety.

KEYWORDS

Magnetism; magnetic losses; hysteresis curve; magnetic measurement; toroidal sample; Epstein frame; synchronous reluctance machine with permanent magnets.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně,

Technická 3058/10

616 00 Brno

Obsah

KLÍČOVÁ SLOVA	2
KEYWORDS	2
1 ÚVOD	5
2 TEORETICKÝ ROZBOR	5
2.1 Způsoby měření magnetických vlastností	5
2.1.1 Epsteinův rám	6
2.1.2 Toroid	6
2.1.3 Vibrační magnetometr	6
2.2 Magnetické vlastnosti dynamoplechů	7
2.3 Plný materiál	7
2.4 Vlastnosti magneticky tvrdých materiálů	8
2.5 Měření magneticky měkkých materiálů	8
2.5.1 Statická hysterezní křivka	9
2.5.2 Dynamická hysterezní křivka	9
2.6 Měření magneticky tvrdých materiálů	10
2.7 Výpočty v Ansys Maxwell	10
2.7.1 Výpočet celkových magnetických ztrát	11
3 ŘEŠENÍ	11
3.1 Chyba magnetických měření	11
3.1.1 Rozložení vinutí	13
3.1.2 Vliv rozptylu a vzduchové mezery	13
3.1.1 Vliv chybně zadaných vstupních parametrů	13
3.1 Vliv způsobu výroby na magnetické vlastnosti	14
3.1.1 Srovnání měření jednoho materiálu na různých mezikružích	14
3.1.2 Magnetické vlastnosti materiálu po opracování různými metodami	15
3.1.3 Různé způsoby výroby a vliv tepelného zpracování	17
3.1.4 Poškození izolace vlivem teploty	19
3.2 Měření plného materiálu	21
3.2.1 Srovnání různých tloušťek mezikruží	21
3.2.2 Feritové magnety HTY45E	23
3.3 Simulace reluktančního motoru s magnety	24
3.3.1 Porovnání simulace s reálným měřením	24
4 ZÁVĚR	28
LITERATURA	30
CURRICULUM VITAE AUTORA	33
ANOTACE	34
ABSTRACT	34

1 ÚVOD

Ztráty v elektrických strojích se vyskytují vždy v menší či větší míře. Jejich velikost se odvíjí od typu stroje, jeho konstrukce a okolních podmínek. Měření ztrát dle norem probíhá dle standardů a ve své podstatě tyto standardní podmínky u většiny používaných strojů nenastávají. Stroj vyhovující v laboratoři se může jevit v reálném provozu jako nevyhovující, protože zde nejsou ideální standardizované okolní podmínky a měřené výstupní charakteristiky se mohou zhoršit. Nikde nebývá specifikováno, jak se projeví použití takového stroje v nestandardních podmínkách, a proto je vhodné provádět testování materiálů nebo částí stroje i při těchto podmínkách. Velikost ztrát v elektrickém stroji ovlivňuje jak elektromagnetický návrh, tak i kvalita použitého materiálu včetně způsobu jeho přípravy a obrábění. Mnohdy i na první pohled zanedbatelná úprava dokáže výrazně změnit materiálové vlastnosti. Mezi další parametry ovlivňující parametry stroje patří okolní teplota a mechanické namáhání. Toto namáhání většinou vzniká při zpracování materiálu ražením do požadovaného tvaru nebo při kompletování stroje. Zanesení mechanického pnutí se je možné vyhnout laserovým řezáním, ale dochází zde pro změnu ke vzniku pnutí tepelného. Toto pnutí může také vzniknout při svařování plechů představujících elektromagnetický obvod. Při návrhu se obvykle s těmito vlivy počítá pouze okrajově a využívá se spíše empirických konstant ke zvýšení předpokládané velikosti ztrát a stroj se navrhuje s větší rezervou. V době zvyšování účinnosti a ceny vyráběného stroje tento postup nemusí být úplně vhodný a mnohem výhodnější je znát změny parametrů materiálu ať již z výroby nebo jejich změnu vlivem opracování a používání za vyšších teplot.

Nejvíce žádoucí je sledovat změnu materiálových vlastností u strojů pro speciální aplikace, mezi které patří synchronní reluktanční a vysokootáčkové motory. U synchronních reluktančních motorů se využívá v rotoru různé magnetické vodivosti a není zde umístěné žádné vinutí. Rotor je plně závislý na rozdílné magnetické vodivosti v d,q osách a jakákoliv materiálová změna se zde více projevuje. Rozdílné vodivosti je dosaženo speciálním tvarem rotorových plechů, které obsahují různé tvarované vzduchové bariéry, a proto se zde řezné hrany vyskytují velice blízko. Tyto motory obvykle nedosahují příliš velkých hodnot momentu, a proto je možné použít pro jeho zvýšení permanentní magnety, které se umístí do rotoru. Jejich použití slouží pouze jako podpora tvorby momentu, avšak díky nim se stává stroj citlivější na ztrátové teplo, které může magnety lehce demagnetizovat a poškodit tak celý stroj.

2 TEORETICKÝ ROZBOR

2.1 ZPŮSOBY MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ

Tato práce je zaměřená na studium magnetických vlastností při různých podmínkách zpracování materiálu a jejich vlivu na měřené magnetické vlastnosti

s aplikací na reluktanční motor s vnořenými magnety. Změnou materiálových vlastností lze kromě velikosti magnetických ztrát ovlivnit i výslednou velikost elektromechanického momentu stroje a jeho celkovou účinnost. Magnetické vlastnosti lze měřit různými způsoby, od kterých se odvíjí i tvar testovaného vzorku.

2.1.1 Epsteinův rám

Epsteinův rám je měřicí zařízení, jenž slouží ke standardizovanému měření magnetických vlastností. Tento rám se skládá z měřicího přípravku definovaných rozměrů a vlastního měřeného vzorku [1]. Pro měření na Epsteinově rámu je nutné mít k dispozici rovné pruhy zkoumaného materiálu, které musí mít přesně definované rozměry a jsou poskládány do tvaru čtverce, přičemž v rozích se tento materiál překrývá. Vlastní měření je založeno na indukční metodě se dvěma vinutími, kde se k napájení primárního vinutí používá buď napěťový, nebo proudový zdroj a indukované napětí, které lze přepočítat na magnetickou indukci, je měřeno pomocí sekundárního vinutí. Ztráty v magnetickém materiálu se měří wattmetrem a vzduchové mezery mezi svazkem plechů a vinutím jsou kompenzovány pomocí dalších cívek, jenž jsou součástí daného přípravku [2–4].

2.1.2 Toroid

Alternativní variantou k standardizovanému Epsteinově rámu je použití toroidního vzorku, jehož velikost může být dle potřeby přizpůsobena. Tento tvar více zohledňuje reálné podmínky v točivém elektrickém stroji, protože magnetické vlastnosti jsou měřeny ve všech směrech válcování daného plechu. Epsteinův rám měří magnetické vlastnosti materiálu na magnetickém obvodu tvaru čtverce, v jehož rozích se magnetická indukce liší od zbytku měřeného obvodu. Daní za toroidní tvar je nemožnost vytvoření univerzálního měřicího přípravku a pro každé měření je nutné navinout nové vinutí. Každý takový toroid je unikátní a vinutí je nutné umístit rovnoměrně přímo na vzorek v žádaném počtu závitů. Počet závitů primárního budicího vinutí se odvíjí od výkonu napájecího zdroje. U sekundárního vinutí je nutné mít na nižší frekvenci dostatek závitů, aby indukované napětí bylo měřitelné, a naopak na vyšší frekvenci zase menší počet závitů, aby velikost indukovaného napětí nepřekročila maximální měřitelnou hodnotu použitého přístroje [1, 5]. Příprava takového měřeného vzorku je zdlouhavá a nehodí se pro průmyslové využití, ale z principu dává přesnější informace o měřeném materiálu a v určitých případech lze použít k měření i méně materiálu, než je potřeba do Epsteinova rámu. V případě požadavků na vyšší sycení je místo uzavřených vzorků možné použít otevřený vzorek, který se skládá např. pouze z jednoho rovného plechu. Výhodou tohoto měření jsou vyšší sycení, ale nedají se zde měřit nízká sycení a je nutné počítat s demagnetizačním faktorem měřeného vzorku.

2.1.3 Vibrační magnetometr

Tento typ měření je založen na použití velmi malých vzorků, které vibrují ve stacionárním magnetickém poli. Vzorek vložený do magnetického pole se magnetuje ve směru vnějšího magnetického pole a díky jeho kmitání dochází

v měřicích cívkách umístěných v blízkosti vzorku k indukování napětí. Postupnou změnou velikosti budícího magnetického pole je možné proměřit celou magnetizační charakteristiku daného vzorku [1]. Měření ovšem není spojitě, ale probíhá nastavování každého bodu charakteristiky zvlášť. Díky tomuto postupu nedochází k rychlé změně magnetického pole a ztráty vířivými proudy se mohou zanedbat. Nevýhodou tohoto měření je ovšem použití malého vzorku, na kterém se nemusí projevit všechny vlivy viditelné z měření na větších vzorcích, nelze zde měřit velikost celkových magnetických ztrát a je nutné uvažovat nepřesnosti vlivem demagnetizačního faktoru, který je pro každý geometrický tvar jiný.

2.2 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI DYNAMOPLECHŮ

Výrobce obvykle udává magnetické vlastnosti vyráběného dynamoplechu na základě standardizovaného měření na Epsteinově rámu, kde je normou ČSN EN 60404-2 zadán tvar i způsob přípravy testovaného vzorku. Každé opracování materiálu mění jeho magnetické vlastnosti, protože dochází k zanášení různých druhů pnutí (mechanické, tepelné) do struktury materiálu, což vede ke zhoršení magnetických vlastností.

Mezi nejčastější způsob výroby žádaného tvaru plechu pro elektrický stroj se používá ražení lisem, které ovšem způsobuje tvorbu otřepů. Další možností je výroba požadovaného tvaru pomocí laseru, který nezpůsobuje tak velké otřepy, ale způsobuje rychlé lokální přehřátí a zchlazení materiálu [6]. Zanesené tepelné pnutí pak zhoršuje celkovou relativní permeabilitu a celkové magnetické ztráty při nižších hodnotách magnetické indukce [7]. Velikost pnutí, které vznikne po ražení na lisu je obecně mnohonásobně menší než při pálení laserem [6, 8–10]. Samotné řezání laserem lze realizovat např. tavnou nebo oxidační metodou. Každá metoda má své výhody, nevýhody [11] a používá se na jiný typ řezání [12]. K řezání dynamoplechů se nejčastěji používá tavná metoda za použití inertního plynu (dusíku). Tato metoda je výhodná z pohledu tvorby minimálních otřepů u řezné hrany. Jak bylo naznačeno, tak různé zanesené druhy pnutí jsou v materiálu nežádoucí, protože zhoršují magnetické vlastnosti [8].

2.3 PLNÝ MATERIÁL

Měření magnetických vlastností u plného materiálu je obzvláště problematické z důvodu výskytu vířivých proudů, které způsobují výrazné ztráty a ohřev materiálu. Vířivé proudy vznikají vždy v různých vodivých konstrukčních součástech, které jsou vystavené působení střídavého magnetického pole o vyšší frekvenci. Tyto proudy lze potlačit použitím materiálu s různými příměsemi jako např. křemíkem [7], který snižuje elektrickou vodivost. Větší množství křemíku ovšem také zhoršuje celkovou obrobitelnost výrobku. Při měření plného materiálu se také vyskytují značné nejistoty vlivem rychlého ohřevu měřeného vzorku. K ohřevu může dojít i při nastavování pouze jediné hodnoty, které trvá v některých případech delší čas. Každá změna magnetického pole vede k natáčení magnetických domén

v materiálu do nového směru a k produkci tepla, která je nežádoucí. Řešením je potom použití střídavého pole o co nejnižší frekvenci a měřit s přestávkami mezi jednotlivými měřeními [1, 5, 13].

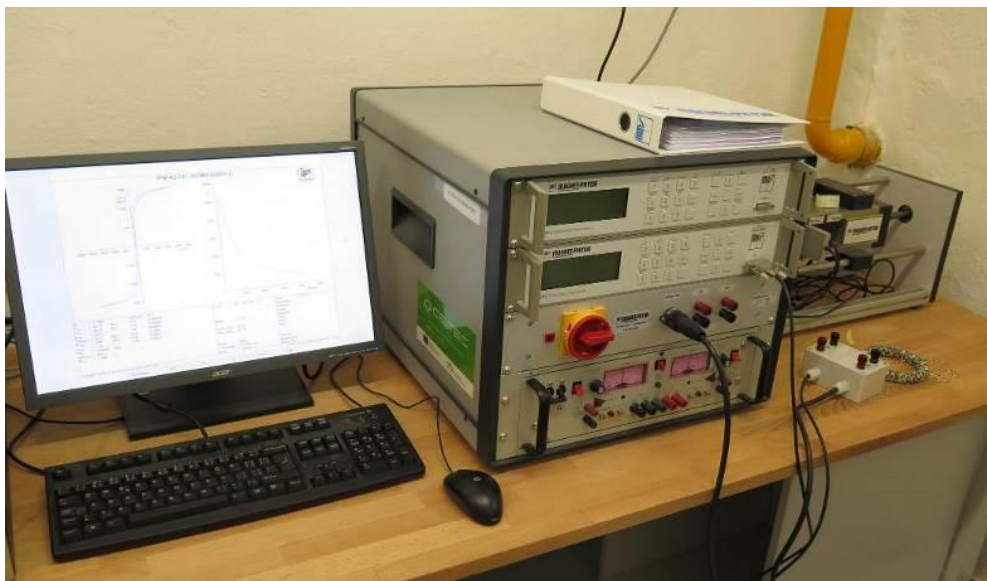
2.4 VLASTNOSTI MAGNETICKY TVRDÝCH MATERIÁLŮ

U těchto materiálů se vyskytuje velmi silná anizotropie a citlivost na teplotu. Magnety ze vzácných zemin dosahují vyšších hodnot magnetické indukce i koercitivní síly. Průběh jejich hysterezní křivky ve druhém kvadrantu je téměř lineární, takže při normálním provozu je velmi obtížné, až nemožné je demagnetovat. Jejich nevýhodou je ovšem velká elektrická vodivost a velká citlivost na teplo (neodymové magnety). Feritové magnety sice mají nižší hodnotu magnetické indukce i koercivity, ale zase mají nízkou hodnotu elektrické vodivosti, což znamená, že jsou velmi odolné vůči ztrátám vířivými proudy [13].

Vzhledem k vysoké citlivosti magnetů na teplotu a následné změně jejich magnetických vlastností je nutné provést obezřetně celý elektromagnetický i tepelný návrh elektrického stroje [14–16]. Magnety představují plný materiál a mohou se zde vyskytnout ztráty vířivými proudy. Velikost ztrát lze omezit použitím magnetu s vyšší rezistivitou nebo segmentací magnetů. Kromě toho se v každém magnetu mohou na celkových ztrátách podílet i hysterezní ztráty, pokud je stroj špatně navržen a pracovní oblast magnetu se dostává až do prvního kvadrantu [17–19].

2.5 MĚŘENÍ MAGNETICKY MĚKKÝCH MATERIÁLŮ

Magnetické vlastnosti lze měřit různými metodami, např. měřením magnetického toku pomocí cívky (indukční metody), měřením síly způsobené magnetickým polem, anebo lze použít metody založené na změnách materiálových vlastností v přítomnosti magnetického pole [1].



Obr. 2.1 Měřicí stanoviště pro měření magnetických vlastností (RemaGRAPH – RemaCOMP C710)

Indukční metody využívají principu Faradayova zákona a jsou založené na měření magnetického toku pomocí cívky. Pro výpočet intenzity magnetického pole H z magnetizačního proudu lze využívat vztah

$$H = \frac{N_1 \cdot I_1}{l_{Fe}}, \quad (1)$$

kde N_1 je počet závitů magnetizačního vinutí, I_1 je proud magnetizačním neboli budícím vinutím a l_{Fe} je střední délka cesty magnetického toku ve vzorku. Výpočet magnetických ztrát P_s je dán vztahem

$$P_s = \frac{1}{m_a} \frac{N_1}{N_2} \frac{1}{T} \int_0^T u_2(t) i_H(t) dt, \quad (2)$$

kde m_a je hmotnost měřeného vzorku, N_1 a N_2 jsou počty závitů primárního a sekundárního vinutí, u_2 je indukované napětí a i_H magnetizační proud, který má amplitudu o velikost I_1 [1]. Výhodou při měření magnetických vlastností indukční metodou je možnost změření hysterezní křivky. Podle podmínek měření existují dva druhy hysterezních smyček, a to statická nebo dynamická.

2.5.1 Statická hysterezní křivka

Statická neboli kvazistatická hysterezní křivka je měřená při dostatečně nízkém kmitočtu, aby bylo možné vyloučit vliv skinefektu a vířivých ztrát. Při kvazistatickém měření dochází primárně k měření magnetické polarizace $J(H)$, která je součástí měřené magnetické indukce a popisuje chování materiálu na atomární úrovni. Výsledná indukce ve feromagnetiku se tedy skládá ze zmíněných dvou složek dle vztahu [20]

$$B(H) = \mu_0 H + J(H). \quad (3)$$

U magneticky měkkých materiálů je vliv magnetizace vakua zanedbatelný a při intenzitě magnetického pole 10 kA/m se jedná o odchylku 12,6 mT, a proto se tedy uvažuje $B(H) = J(H)$.

2.5.2 Dynamická hysterezní křivka

Dynamická smyčka je hysterezní smyčka, která je získaná při frekvenčním měření. Uplatňují se zde ztráty vířivými proudy a plocha smyčky je ve vodorovné ose rozšířena ve směru H o příspěvek vířivých ztrát. Plocha smyčky je úměrná součtu hysterezních i vířivých ztrát, avšak jejich poměrové zastoupení nelze přesně ze smyčky zjistit. U dynamických smyček magneticky měkkých materiálů je předpoklad, že intenzita magnetického pole H je relativně malá. Není zde žádný významný rozdíl mezi magnetickou indukcí B a polarizací J , a proto se zde určuje pouze magnetická indukce. Například pro $H = 8000$ A/m je rozdíl mezi B a J pouze 0,01 T. K měření dynamických křivek je možné použít přístroj RemaCOMP. Intenzita magnetického pole je určena přímo z napěťového úbytku $U_H = R \cdot I$ přes měřicí rezistor R s nízkou indukčností. Sekundární napětí je poté numericky integrováno, aby byla získána magnetická indukce B [21]. Vztahy pro výpočet magnetické indukce jsou

$$u_i(t) = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \cdot S_{Fe} \frac{dB}{dt}, \quad (4)$$

a

$$B(t) = \frac{1}{N_2 \cdot S_{Fe}} \int u_i(t) dt. \quad (5)$$

Indukované napětí u_i je vzorkováno A/D převodníkem a je úměrné počtu sekundárních závitů N_2 , průřezu magnetického obvodu a také napájecí frekvenci [21].

2.6 MĚŘENÍ MAGNETICKY TVRDÝCH MATERIÁLŮ

Vlastnosti permanentních magnetů lze získat pomocí hysteresisgrafu (např. PermaGraph) nebo vibračního magnetometru. Nejčastěji se používá hysteresisgraf, který je připojen k měřicímu jhu s elektromagnety a měření provádí kvazistaticky. Testovaný vzorek je obklopen měřicími cívkami a je vložen mezi pólové nástavce s elektromagnety, které přiléhají celou plochou k testovanému vzorku. Feritové magnety je možné na začátku každého měření namagnetovat pomocí elektromagnetů umístěných v pólových nástavcích měřicího přístroje. Permanentní magnety ze vzácných zemin, které by se obtížně magnetovaly pomocí vestavěných elektromagnetů, je vhodné před vlastním měřením namagnetovat v externím pulzním magnetizéru. Elektromagnet v pólových nástavcích následně postupně (kvazistaticky) mění magnetické pole a měřený signál je v připojených fluxmetrech integrován a v počítači zpracováván [22, 23]. Celkové použití této metody patří mezi rozšířené, protože využívá dostatečně velké testovací vzorky, které lze velmi snadno připravit i testovat. Měření pomocí vibračního magnetometru vyžaduje mnohem menší velikost testovaného vzorku, ale výstupní parametry z tohoto měření (magnetický moment a pole) jsou nevhodné pro další výpočty při návrhu elektrických strojů a slouží pouze pro testování a porovnávání materiálů mezi sebou [22, 23].

2.7 VÝPOČTY V ANSYS MAXWELL

Při magnetostatické analýze v programu Ansys Maxwell se neuplatňují žádné časové změny v simulovaném modelu a všechny objekty jsou považovány za stacionární. Výpočty jsou založené na Ampér-Maxwellově zákonu a Gaussově rovnici magnetického pole [24].

Transientní analýza umožňuje modelování magnetických polí a přechodových dějů, což přináší delší trvání simulace a nutnost nastavení dalších parametrů. Délku simulace ovlivňuje počet vzorků a hustota výpočetní sítě, a proto je vhodné přijmout určité zjednodušující předpoklady, které zkrátí délku výpočtu. Obecně je simulování ve 2D rychlejší než ve 3D, ale komplexnější pohled poskytuje právě 3D simulace.

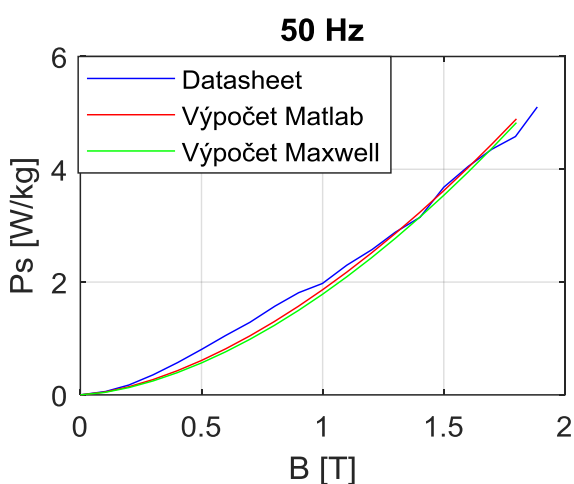
2.7.1 Výpočet celkových magnetických ztrát

Mezi základní požadavky při nastavování simulace patří vložení materiálových vlastností, které podléhají korekcím ze strany simulačního programu. Maxwell využívá k výpočtům celkových magnetických ztrát v měkkých magnetických materiálech Steinmetzovu rovnici [24, 25]

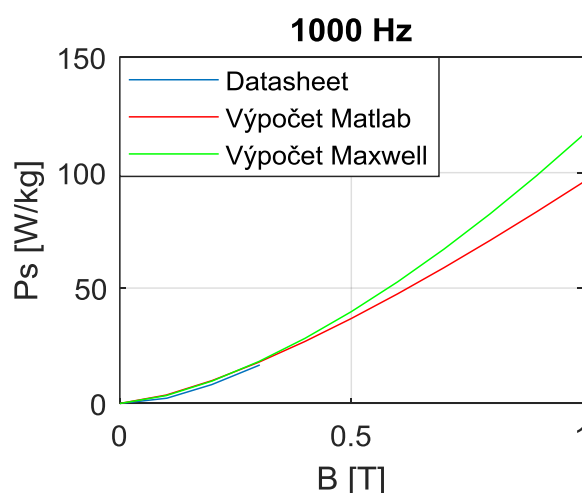
$$P_{mag} = P_h + P_v + P_d = K_h B_{max}^2 f + K_v (B_{max} f)^2 + K_d (B_{max} f)^{1.5} = K_1 B_{max}^2 + K_2 B_{max}^{1.5}, \quad (6)$$

kde K_h je koeficient hysterezních ztrát, K_v koeficient vířivých ztrát, K_d koeficient přídatných ztrát, B_{max} je maximální magnetická indukce a f je frekvence [24]

Vzhledem k tomu, že Maxwell nezohledňuje procentuální zastoupení velikosti ztrát u vyšších frekvencí tak je vhodné provést vlastní výpočet ztrátových koeficientů a tím zohlednit velikost ztrát při vyšších frekvencích [26]. Vlastní výpočet je možné realizovat na základě operací s maticemi [27].



Obr. 2.2 Porovnání BP křivek pro 50 Hz
M330-35A Laser – 7 frekvencí



Obr. 2.3 Porovnání BP křivek pro 1000
Hz M330-35A Laser – 7 frekvencí

Porovnání ztrátových křivek získaných z měření na neorientovaném plechu M330-35A ukazuje, že aproximace vložených ztrátových křivek je nutná a je vhodné provést i vlastní výpočet ztrátových koeficientů pro vyšší frekvence. Následně se do programu zadají ztrátové koeficienty, které nejvíce odpovídají realitě.

3 ŘEŠENÍ

Pro správnou identifikaci velikosti ztrát v elektrických strojích je nutné znát kromě vlastností materiálů i přesnost měření, která budou na testovaném materiálu prováděna.

3.1 CHYBA MAGNETICKÝCH MĚŘENÍ

Při provádění provozní diagnostiky je důležité, aby testované vzorky byly:

- Ve tvaru uzavřeného magnetického obvodu, bez vzduchových mezer [5].
- S přesně definovanými geometrickými rozměry [5].

- c) S přesně definovaným způsobem výroby vzorku (lis, laser ...).
- d) S přesně definovanou přípravou vzorku k měření (např. upnutí do držáku)
- e) Měřeny při konstantní teplotě (teplota nesmí překročit 50 °C) a bez mechanického namáhání (ČSN EN 60404-4).

Pokud nedojde k dodržení všech výše zmiňovaných zásad, tak je magnetické měření nereprodukovatelné. Při dodržení všech zásad a opakování měření lze vypočítat u toroidního vzorku měřeného na velikosti magnetické indukce 1,5 T hodnoty maximální relativní chyby do 1–2 % a nejistoty A viz Tabulka 3.1. Vzniklé odchylky jsou způsobené opakovaným nepřesným automatickým nastavováním požadované velikosti magnetické indukce.

Tabulka 3.1 Vypočtené velikosti chyb a nejistoty A pro 1,5T

	Průměr	Maximální odchylka	Rozptyl měřené hodnoty	Maximální relativní chyba	Nejistota A	
B_r	260,8	1,8	3,0	0,66 %	0,4	mT
H_c	121,7	0,8	1,0	0,60 %	0,1	A/m
B_{max}	1,5	0	0	0,00 %	0	T
H_{max}	3848	28	40	0,73 %	4,0	A/m
P_s	4,037	0,088	0,130	2,16 %	0,015	W/kg
μ_r	309,7	2,27	3,0	0,73 %	0,3	

Mezi nejvýznamnější zdroje chyb u výpočtu nejistoty B patří:

- a) Chemické složení testovaného materiálu a způsob jeho zpracování výrobcem. Při srovnávacím měření je vhodné testovat materiál ze stejné šarže.
- b) Různé metody opracování např. lis, laser, elektrojiskrové obrábění, vodní paprsek, nůžky apod. mění výsledné parametry materiálu.
- c) Výsledné měření ovlivňuje i zvolený geometrický rozměr, jeho přesnost a zvolený typ měření (otevřený nebo uzavřený vzorek).
- d) Důležité je také umístění primárního vinutí, které by mělo být rovnoměrně rozložené po celé délce zkoumaného vzorku a pokud možno kolmé na magnetický tok.
- e) U lakovaných vodičů je také důležité, aby byly konce dostatečně očištěné od lakové izolace, aby zde nebyl velký přechodový odpor po připojení k napájení nebo měření.
- f) Nepřesnost fluxmetru u použitého zařízení byla 0,1 % ze čtení $\pm 10^{-7}$ Vs.
- g) Přesnost analog/digitálního převodníku při napětí pod 10 V byla 0,2 % ze čtení, při napětí nad 10 V je přesnost 0,7 % ze čtení.
- h) Chyba přístroje je závislá na rychlosti nastavení požadované hodnoty. U některých materiálů nastaví přístroj správnou hodnotu magnetické indukce

velmi rychle a provede měření v řádech jednotek sekund, u některých materiálů pomaleji, materiál se poté ohřeje a tím se zvětší chyba měření. V některých případech se u měřených vzorků stává, že nastavovací software měření místo jednotek sekund nastavuje měření mnohem déle (např. 120 a více sekund). Pokud nastane tato situace, tak zde již hrozí při větších hodnotách magnetické indukce zahřátí měřeného vzorku.

3.1.1 Rozložení vinutí

Dle literatury [1, 20, 28] je doporučováno, aby sekundární vinutí bylo navinuto co nejtěsněji okolo průřezu a rovnoměrně po délce měřeného vzorku. Při kontrolních měřeních na testovacích vzorcích různého tvaru může ovšem nastat situace, že je obtížné nebo nemožné navinout primární vinutí rovnoměrně přes sekundární vinutí. Pak může nastat situace, že získané výsledky neodpovídají realitě.

Celkem bylo měřeno 5 vzorků s různě rozmístěným primárním vinutím, Vzorek 1 byl ideálně navinutý. Primární vinutí u dalších vzorků nebylo nikde úplně po celém obvodu a lišilo se v umístění tohoto vinutí přes sekundární vinutí. Vzorky 2 a 3 neměly primární vinutí přes sekundární vinutí a Vzorky 4 a 5 měly umístěné primární vinutí přes sekundární.

Dle získaných výsledků se měřené veličiny téměř shodovaly do sycení magnetické indukce 1,0 T. Jakmile došlo k nasycení materiálu tak vlivem větších rozptylových toků kolem nenamotané části toroidu docházelo ke zkreslení výsledků. Na základě měření je možné tvrdit, že není důležitý počet primárních závitů (Vzorek 2 vs Vzorek 4) pokud je dostatečně výkonný budicí zdroj, ale umístění těchto závitů na testovaném vzorku s ohledem na sekundární vinutí, které by mělo být umístěno vždy pod primárním vinutím.

3.1.2 Vliv rozptylu a vzduchové mezery

Jak již bylo zmíněno dříve, mezi zdroj chyb při měření patří i velikost vzduchové mezery mezi vinutím a testovaným vzorkem. Tento zdroj chyb je možné korigovat vztahem (7) [21].

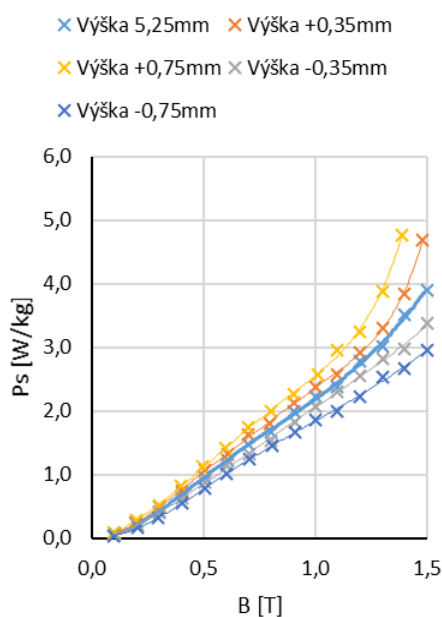
$$B_{korekce} = B - \mu_0 H \cdot \frac{S_{vin} - S_{Fe}}{S_{Fe}}, \quad (7)$$

kde S_{vin} je průřez, které obepíná sekundární vinutí, S_{Fe} je průřez vlastního testovaného vzorku. V reálné situaci dosahuje tloušťka PVC izolace, která může ovlivnit měřený průřez obvykle do 0,5 – 1 mm. Tato tloušťka izolace se na měřené magnetické indukci projeví dle výpočtů u toroidu s vnějším průměrem 120 mm pouze do maximální hodnoty 0,36 %, což ve srovnání s dalšími vlivy je zanedbatelné.

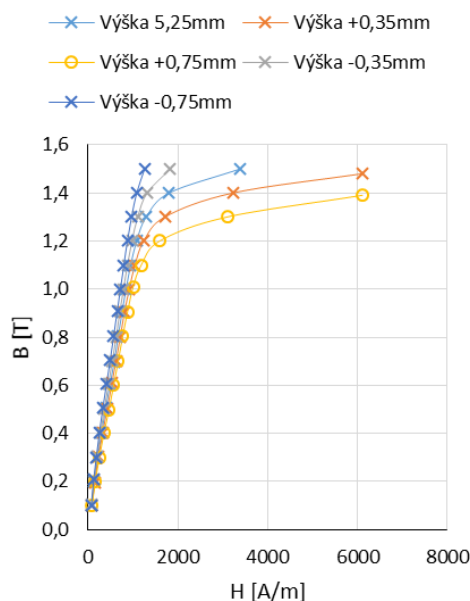
3.1.1 Vliv chybně zadaných vstupních parametrů

Při měření magnetických vlastností je velmi důležité správně změřit a zadat geometrické rozměry testovaných vzorků, včetně změření hmotnosti vzorku

a množství závitů primárního a sekundárního vinutí. Velikost chyby zadávaného počtu závitů závisí na celkovém počtu použitých závitů u daného vinutí. Větší chyby se tedy obvykle dosahuje u sekundárního vinutí, které má obvykle menší množství závitů. Jak se projeví odlišný průřez lze vidět na Obr. 3.1 a Obr. 3.2.



Obr. 3.1 Celkové magnetické ztráty pro rozdílnou výšku



Obr. 3.2 Magnetizační křivky pro různou výšku

Změnou výšky svazku se změní celkový průřez, podle kterého se počítá velikost magnetické indukce v obvodu. Větší fiktivní průřez následně způsobí, že dojde k přesycení magnetického obvodu. Měření je obvykle nastavováno na velikost magnetické indukce. Správná výška testovaného toroidu byla 5,25 mm a k značným odchylkám už docházelo při odlišné výšce o 0,35 mm (relativní chyba výšky je 6,7 %) a 0,75 mm (relativní chyba výšky je 14,3 %). Velikost chyby se liší pro každou měřenou veličinu. Pokud dojde k chybě při určování hmotnosti, tak dle očekávání jsou ovlivněny pouze celkové magnetické ztráty přepočítávané na W/kg.

3.1 VLIV ZPŮSOBU VÝROBY NA MAGNETICKÉ VLASTNOSTI

3.1.1 Srovnání měření jednoho materiálu na různých mezikružích

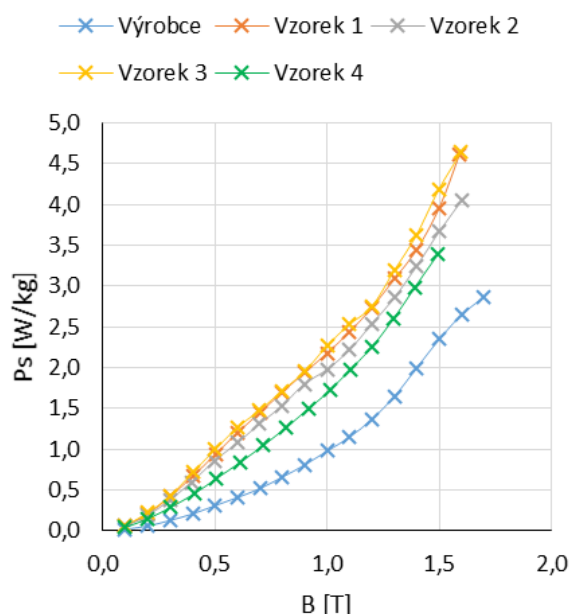
Jakmile je vybrán vhodný materiál, je žádoucí provést kontrolní měření jeho magnetických vlastností. Materiál M250-35A byl testován na 4 různých velikostech toroidů. Vzorky na testovací měření byly připraveny laserem a naměřené průběhy jsou srovnávány pro zajímavost s poskytovanými daty od výrobce Sura Cogent. Srovnání není úplně rovnocenné, protože vzorky od výrobce byly připraveny jiným způsobem, a i měřeny jiným způsobem. Výrobce používá Epsteinův rám, na který se

připravuje materiál mechanickým stříhem, a stříhem ovlivněné hrany jsou díky tomu od sebe vzdáleny 30 mm.

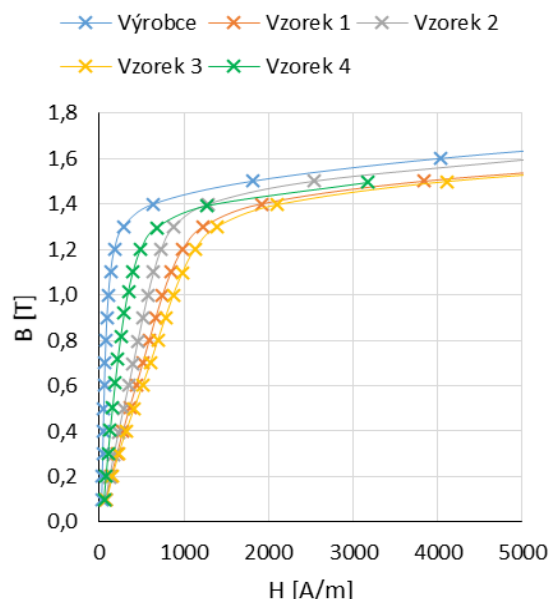
Tabulka 3.2 Parametry testovaných vzorků materiálu M250-35A

M250-35A	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	
Vnější průměr vzorku	60	120	80	120	mm
Vnitřní průměr vzorku	48	105	70	90	mm
Výška vzorku	6	7,6	5,3	15,1	mm
Délka mag. obvodu	169,6	353,4	235,6	329,9	mm

Jak lze poznat z Tabulka 3.2, tak materiál byl testován pro vzorky s různými geometrickými rozměry. Zjištěné vlastnosti lze nalézt v grafech na Obr. 3.3 a Obr. 3.4. Všechny průběhy jsou orientačně srovnány na budicí frekvenci 50 Hz.



Obr. 3.3 M250-35A (magnetické ztráty) – srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno)



Obr. 3.4 M250-35A (magnetizace) – srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno)

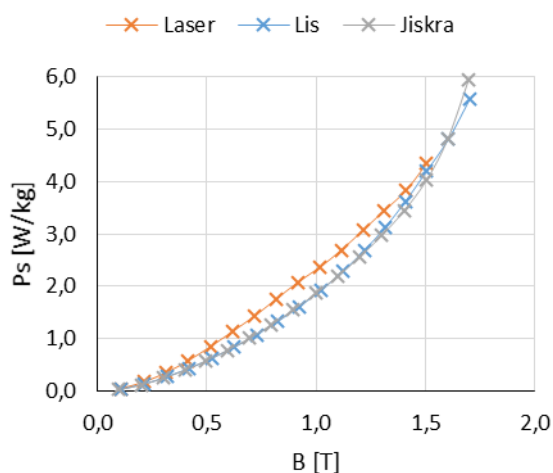
Jak je patrné z grafů uvedených výše, tak magnetické parametry materiálu poskytované výrobcem jsou vždy minimálně dvojnásobně lepší jak z měření na toroidních vzorcích. Podrobněji budou vlivy výroby zkoumány v další kapitole. Při srovnání laserovaných vzorků mezi sebou je patrné, že magnetické vlastnosti materiálu byly tím horší, čím více se přibližovaly řezné hrany.

3.1.2 Magnetické vlastnosti materiálu po opracování různými metodami

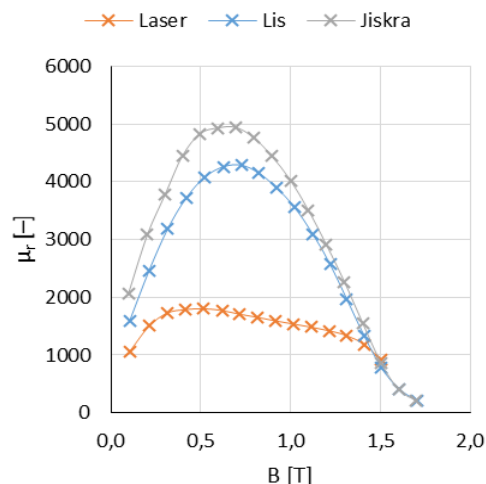
Způsob výroby výrazně ovlivňuje magnetické vlastnosti magneticky měkkého materiálu. Srovnání bylo provedeno u plechu M470-50A pro řezání laserem, elektrojiskrou a ražením na lisu. U plechu M330-35A bylo srovnáváno řezání vodním paprskem, laserem a elektrojiskrou. Optickým mikroskopem byla zjištěna velikost zrn materiálu, která byla i při různých způsobech výroby stejná.

K mechanické deformaci zrn v blízkosti řezné hrany došlo pouze u ražení lisem a při řezáním vodním paprskem. Laserové i elektrojiskrové řezání velikost zrn neovlivňovalo.

Srovnání výsledků měření při 50 Hz pro tři druhy výrob u materiálu M470-50A ukázalo, že laserové řezání nejvíce ovlivňuje relativní permeabilitu a elektrojiskrové řezání je nejšetrnější vůči testovanému vzorku.



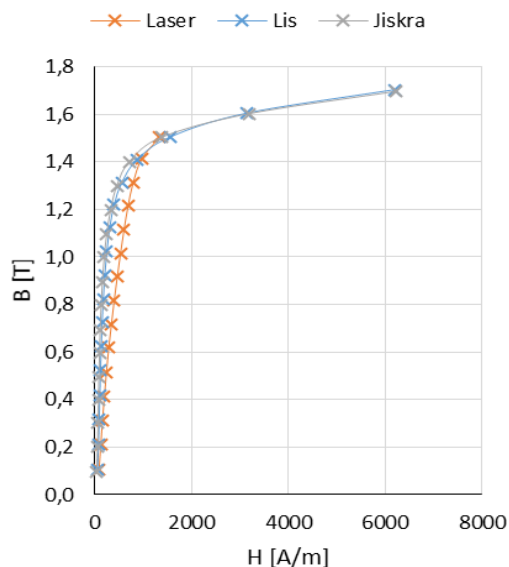
Obr. 3.5 Celkové magnetické ztráty při 50 Hz; M470-50A



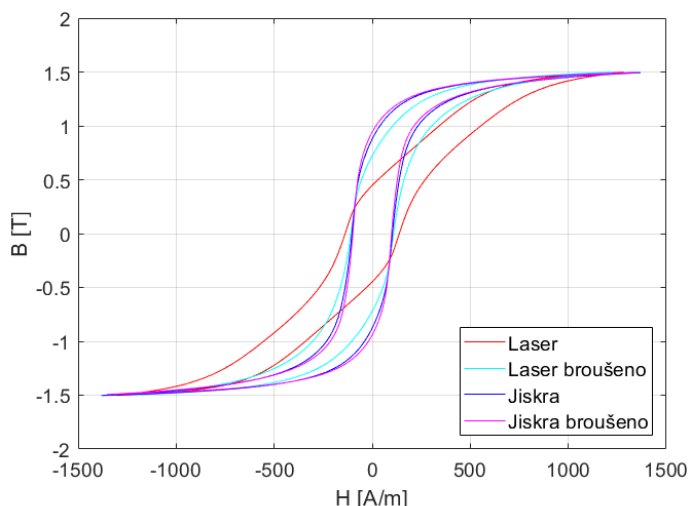
Obr. 3.6 Velikost relativní permeability při 50 Hz; M470-50A

Měřením na dynamoplechu M470-50A a M330-35A bylo ověřeno, že způsob výroby ovlivňuje magnetické vlastnosti materiálu různou měrou. Nejvíce došlo k ovlivnění magnetických vlastností a výsledné relativní permeability u vzorků pálených laserem při menších hodnotách magnetické indukce. Došlo zde také k deformaci hysterezní křivky, které je nejvíce viditelné na nízkých frekvencích a na vyšších frekvencích vlivem vířivých proudů zaniká. Zhoršení parametrů je způsobeno extrémním nárůstem a opětovným poklesem teploty při řezání vzorku. Rychlá změna teploty způsobuje tepelné pnutí uvnitř materiálu, které ovlivní výsledné parametry.

Výsledná hysterezní křivka po laserování je deformovaná a vykazuje znaky složení z hysterezních křivek dvou odlišných materiálů. Testování složení materiálu kolem řezné hrany i uprostřed materiálu neodhalilo změnu složení materiálu. K testování byla použita mössbauerova spektroskopie, energetická disperzní rentgenová analýza (EDX) a optická emisní spektroskopie s doutnavým výbojem (GDOES). Tenká vrstva kolem řezné hrany byla zakalená prudkým nárůstem teploty a následným rychlým chladnutím, takže jediná změna proběhla v textuře materiálu v místě řezu. Po odstranění přehřáté vrstvy testovaného vzorku broušením (o 0,1 mm) došlo k uvolnění indukovaného tepelného pnutí Obr. 3.8. Hysterezní křivky se následně vrátily k původnímu tvaru, a i velikost celkových magnetických ztrát opět poklesla na hodnotu jak při elektrojiskrovém řezání. U elektrojiskrového řezání nemělo obroušení brusným papírem zásadní vliv na magnetické parametry.



Obr. 3.7 Magnetizační křivky při 50 Hz; M470-50A

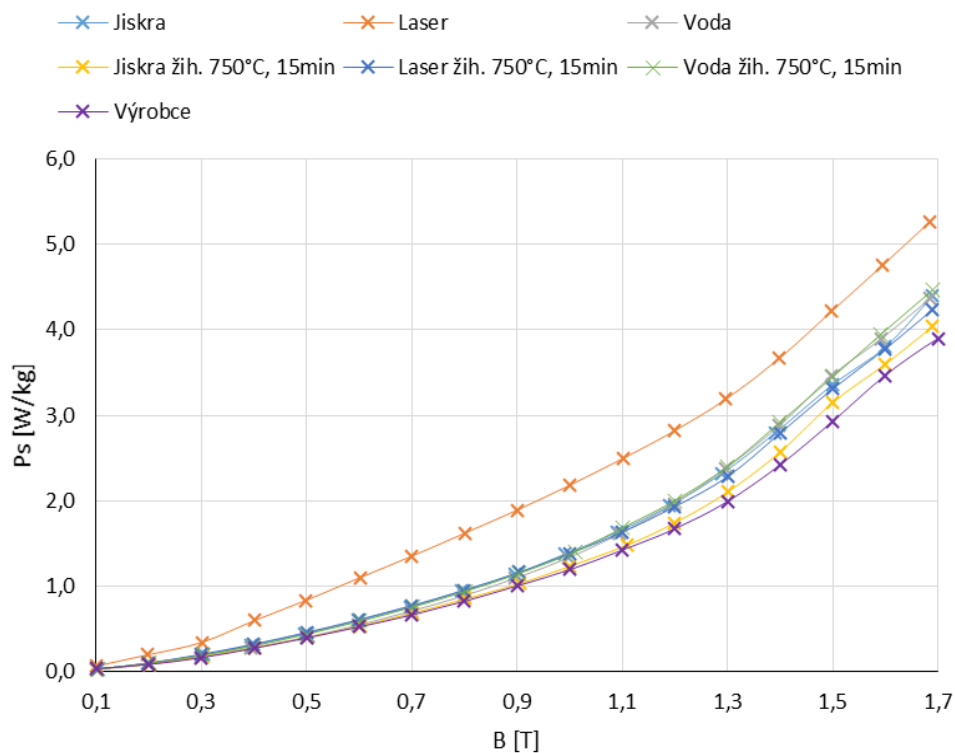


Obr. 3.8 Srovnání BH křivek vzorků po obroušení 50Hz, 1,5T; M470-50A

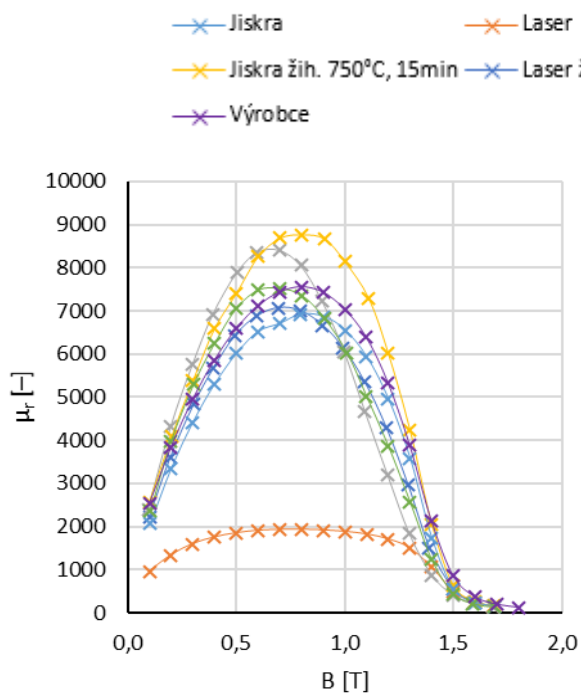
3.1.3 Různé způsoby výroby a vliv tepelného zpracování

Jak bylo řečeno dříve a v literatuře [29–32], tak dalším způsobem jak ovlivnit magnetické vlastnosti materiálů je podrobit tento materiál žihání. Teplota a délka trvání žihání se určuje dle použitého typu povrchové izolace. Každý typ má jiné parametry a dokáže přecukat rozdílné parametry tepelného zpracování. V případě nedodržení pokynů výrobce hrozí riziko zničení izolace a následná oxidace materiálu. Každý výrobce daného materiálu udává maximální teplotu při zvolené atmosféře, kterou izolace dokáže přecukat bez poškození. Na vzduchu izolace bez poškození přecuká obvykle teplotu okolo 180 °C. Pro vyšší teploty je nutné použít ochrannou atmosféru, aby nedošlo k nežádoucí oxidaci materiálu. Maximální teplota v ochranné atmosféře dusíku, argonu nebo vakuu bývá obvykle 500–780 °C [33, 34].

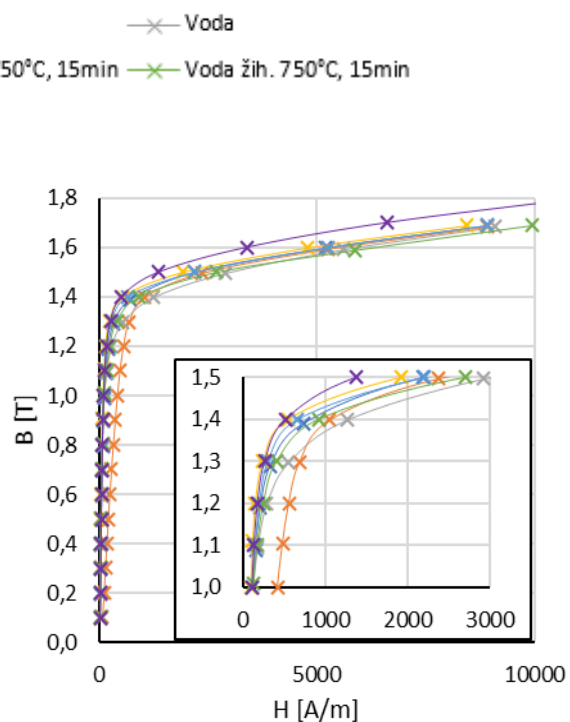
V rámci ověření vlivu žihání na materiál dynamoplechů byl zvolen plech M330-35A. Vzorky byly připravené řezáním – laserem, vodou, elektrojiskrově a následně žihány ve vakuu po různě dlouhou dobu při různé teplotě. Uvažované časy pro teplotu 650 °C byly 30, 60 a 120 minut a pro teplotu 750 °C, časy 5, 10 a 15 min. Největšího zlepšení dosáhl materiál po žihání na teplotě 750 °C v délce 15 minut, ale i pro žihání při teplotě 650 °C v délce 30 min bylo pozorovatelné zlepšení magnetických vlastností.



Obr. 3.9 M330-35A – Celkové magnetické ztráty při 50 Hz



Obr. 3.10 M330-35A – Velikost relativní permeability při 50 Hz



Obr. 3.11 M330-35A – Magnetizační křivky při 50 Hz + detail

Po vyžehnutí materiálu se měřené hodnoty magnetické indukce a ztrát přiblížily k hodnotám uváděných výrobcem. Na základě zjištěných informací lze tvrdit,

že žíhání na teplotě vyšší než 600 °C v ochranné atmosféře dokáže zlepšit magnetické vlastnosti, obzvláště po řezání laserem. U ostatních druhů výroby nebylo zlepšení tak výrazné.

3.1.4 Poškození izolace vlivem teploty

Každý plech z oceli určené pro elektrické stroje je potažen tenkou vrstvou elektrické izolace. Tato povrchová vrstva minimalizuje ztráty způsobené vířivými proudy. Vlivem poškození těchto povlaků se mohou vířivé proudy uzavřít mezi sousedními plechy a ohřát vlivem vířivých ztrát celý svazek [35–37]. Elektrické stroje pak mají horší účinnost nebo úplně nevyhoví zadaným požadavkům. Poškození izolace může nastat po mechanickém nárazu nebo při ohřátí na nadlimitní teploty bez ochranné atmosféry. Z pohledu magnetismu je žíhání prospěšné na testované parametry, protože dochází k relaxaci materiálu a uvolnění napětí nashromážděného vlivem výroby [1]. Vlivem překročení mezní teploty bez ochranné atmosféry může dojít k degradaci změny barvy a snížení ochranné funkce izolace [34].

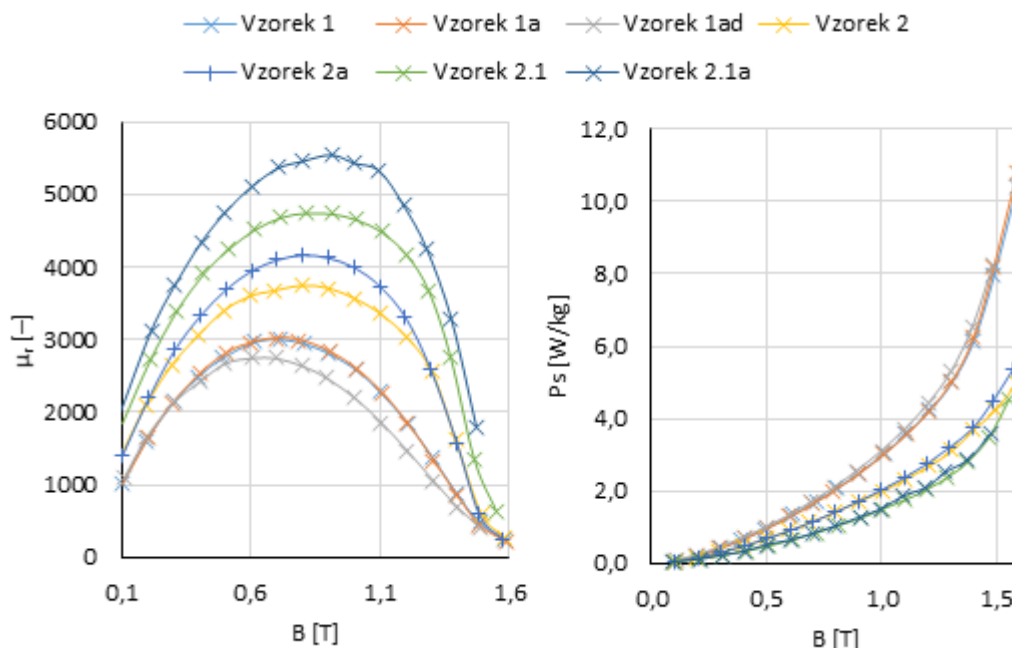
Testované vzorky byly z komerčně prodáváného izolovaného křemíkového neorientovaného plechu. Izolační vrstva byla C-5 s odolností na vzduchu 180 °C a v ochranné atmosféře 850 °C [34]. Testované toroidní vzorky byly připraveny ve dvou verzích průměrů laserem (větší mezikruží) a elektrojiskrovým řezáním (menší mezikruží). Žíhání bylo provedeno bez ochranné atmosféry po dobu 5 hodin na 500 °C. Během žíhání došlo dle očekávání vlivem oxidace ke zhnědnutí povrchové izolace.

Tloušťka izolační vrstvy byla určena Optickým emisním spektroskopem s doutnavým výbojem (Glow-discharge optical emission spectroscopy – GDOES) na hodnotu 0,375 μm . V povrchové vrstvě došlo vlivem žíhání k oxidaci a změně složení izolace. Nejvýrazněji se v povrchové vrstvě projeví oxidy železa a následně změna procentuální velikosti uhlíku a křemíku.

Z magnetických výsledků se jako nejlepší jeví porovnání frekvenčního měření pro různé vzorky (žíhané a nežíhané při různých velikostech). Vlivem zhoršené izolace je předpoklad, že by se měly u střídavého měření projevovat větší ztráty způsobené vířivými proudy. Vlastní měření sice neumožňuje oddělit velikost vířivých ztrát od změřených celkových magnetických ztrát, ale při porovnání stejného vzorku před a po vyžíhání je možné zjistit nárůst celkových magnetických ztrát a šířky hysterezní křivky vlivem vířivých proudů.

Bylo připraveno několik variant testovaných vzorků, které byly označeny různými indexy. Menší testované toroidy jsou označeny indexem 1 a větší indexem 2. Žíhání vzorku je označeno indexem *a*. Pro srovnání byly i u menšího vzorku plechy následně mechanicky obroušeny a opět přeměřeny jejich vlastnosti. Tato úprava je označena indexem *d*. Větší vzorky byly přeměřeny i pro verzi pouze jednoho plechu, index 2.1.

Na následujících grafech je možné vidět porovnání několika velikostí vzorků před a po žíhání. Je zde porovnávána velikost relativní permeability, magnetických ztrát a magnetizační charakteristika těchto vzorků.



Obr. 3.12 Relativní permeabilita při 50 Hz pro malé a velké vzorky

Obr. 3.13 Ztráty pro malé i velké vzorky při 50 Hz

Na Obr. 3.12 je vidět srovnání všech testovaných vzorků z pohledu relativní permeability při měření na 50 Hz. Vzhledem k výrazně odlišným geometrickým rozměrům a blízkostem řezných hran jsou odlišné i měřené charakteristiky pro velké a malé vzorky. Obecně lze říci, že relativní permeabilita po vyžíhání u každého vzorku vzrostla. Po vyžíhání došlo k uvolnění indukovaného pnutí uvnitř plechu a zlepšení magnetických vlastností. Na Obr. 3.13 jsou znázorněny celkové magnetické ztráty, které se výrazně neliší pro žíhané a nežíhané vzorky. U větších vzorků byly změřeny menší magnetické ztráty díky větší vzdálenosti řezných hran u testovaného mezikruží. Mírně větší ztráty se projevovaly až od větší saturace vzorku (cca 1 T) při 50 Hz, ale stále navýšení nebylo příliš výrazné.

Získané výsledky indikují, že izolační povlak C-5 je sice po žíhání při teplotě 500 °C/5 hodin /bez ochranné atmosféry poškozený, ale nedojde k jeho úplnému zničení. Funkci izolace představuje i vrstvička oxidů železa, která vzniká v místě poškození izolačního povlaku. Žíhání samo o sobě mělo na testované vzorky příznivý vliv, obzvláště dle kvazistatického měření. U žíhaných vzorků došlo k uvolnění z výroby nashromážděného pnutí. V rámci dalšího výzkumu by bylo vhodné provést kontrolní měření na skutečném elektrickém stroji, jehož plechy budou v jedné variantě vyžíhány. Větší stlačení plechů při kompletování svazku povede pravděpodobně k větším ztrátám. Poškozená izolace může přestat plnit svou funkci a pozitivní účinek žíhání může být vyrušen většími vířivými proudy vlivem zkratování použitých plechů.

3.2 MĚŘENÍ PLNÉHO MATERIÁLU

K měření vlastností plného materiálu je nejvhodnější použít měření na toroidních vzorcích, protože se jedná o uzavřený vzorek a lze na něm provádět i frekvenční měření.

3.2.1 Srovnání různých tloušťek mezikruží

Samotné měření toroidního vzorku vyrobeného z plného materiálu má svá specifika. Je nutné zvolit adekvátních geometrické rozměry. U malých vzorků je nevýhodou, že se výrazně projevuje vliv opracování a na vyšších frekvencích i vliv skin efektu, který přesycuje povrchovou vrstvu materiálu více jak u velkého vzorku nebo hotového rotoru. Příliš velké rozměry testovaného vzorku, mají nevýhodu ve vyšších nárocích na napájecí zdroj, který musí být schopen dodat větší výkon. Mezi hlavní nevýhodu velkých vzorků patří větší hodnota vířivých proudů, které se uzavírají v materiálu a způsobují jeho výrazný ohřev.

Z materiálu 42CrMo4 byly připraveny toroidy s různými geometrickými rozměry. V jedné variantě, kdy je vzorek označen V1, byl materiál vyválnčován z původní výšky válce 2 mm na 1,6 mm. Z takto vyválnčovaného materiálu byl připraven toroid, u kterého byly zjištěny magnetické vlastnosti. Po změření byl toroid vyžihán ve vakuu po dobu 1 hodiny při 500 °C a následně opět proměřen na magnetické vlastnosti, které se po vyžihání opět obnovily.

Tabulka 3.3 Geometrické rozměry a vstupní parametry testovaných vzorků z materiálu 42CrMo4

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	V1	V1 a	
Vnější průměr	55	44,3	44,4	55	55	55	55	38	38	mm
Tloušťka	1	2	3,1	3,8	5	7,5	11	1,6	1,6	mm
Hmotnost	4,6	3,9	9,4	17,7	30,9	64,9	129,5	2,1	2,1	g
Poměr průměrů	1,16	1,10	1,17	1,16	1,22	1,37	1,67	1,09	1,09	

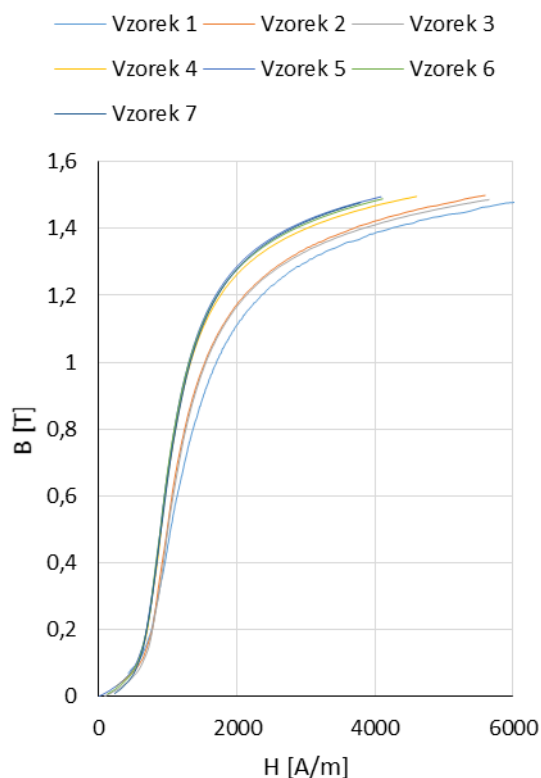
Stručné výsledky měření lze vidět v Tabulka 3.4, kde je provedeno srovnání zjištěných hodnot pro sycení 1,5T. Vzorek 1, který byl nejtenčí z testovaných vzorků, vykazoval nejmenší hodnotu maximální relativní permeability a remanentní indukce. Ostatní parametry nabývaly vyšší hodnoty, což předpokládá větší hodnotu ztrát vlivem přesycení materiálu. Další srovnávané vzorky se stejným vnějším průměrem 4, 5 a 7 vykazují stejné parametry až na maximální intenzitu magnetického pole, která se snižuje s vzrůstajícím poměrem průměrů. Chyba měření při použití nesprávného poměru průměrů vede ke zkreslení hysterezní křivky, ale až v nasyceném stavu. Dříve se chyba výrazněji neprojevila. Vzorky 2 a 3 vykazovaly nižší hodnotu remanentní magnetické indukce s nižší maximální hodnotou relativní permeability. Maximální intenzita magnetického pole byla

pro oba vzorky prakticky stejná. U válcovaného vzorku V1 je patrné, že válcováním se zvýší intenzita magnetického pole i koercivita. Naopak klesne relativní permeabilita a remanentní indukce. Po vyžhání dojde k opětovnému zvýšení relativní permeability s remanentní indukcí a snížení intenzity magnetického pole s koercivitou.

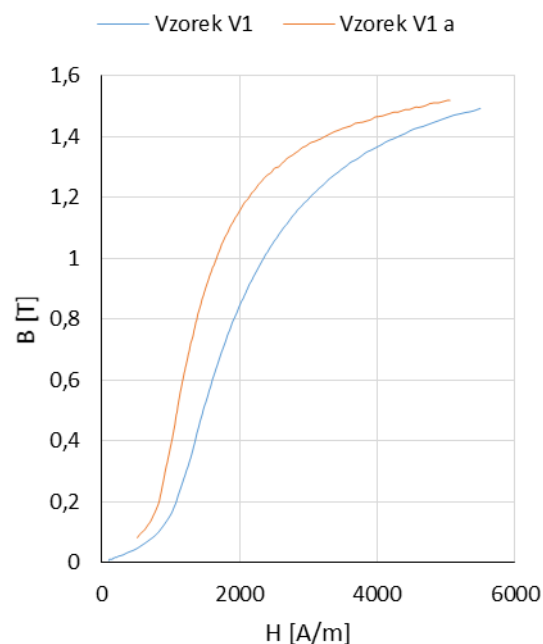
Tabulka 3.4 Výsledky kvazistatického měření na materiálu 42CrMo4

Vzorek	1	4	5	7	2	3	V1	V1 a	
$B_{\max}$	1,513	1,503	1,501	1,483	1,507	1,495	1,499	1,53	T
B_r	1,18	1,3	1,31	1,31	1,24	1,24	1,036	1,24	T
H_c	965	891	885	902	928	947	1321	1057	A/m
$\mu_{\max}$	474	601	611	602	523	518	340	587	
$H_{\max}$	6866	4602	4088	3790	5595	5650	5501	5061	A/m

Celé průběhy kvazistatických měření lze nalézt pro Vzorky 1-7 na Obr. 3.14 a pro válcované vzorky na Obr. 3.15.



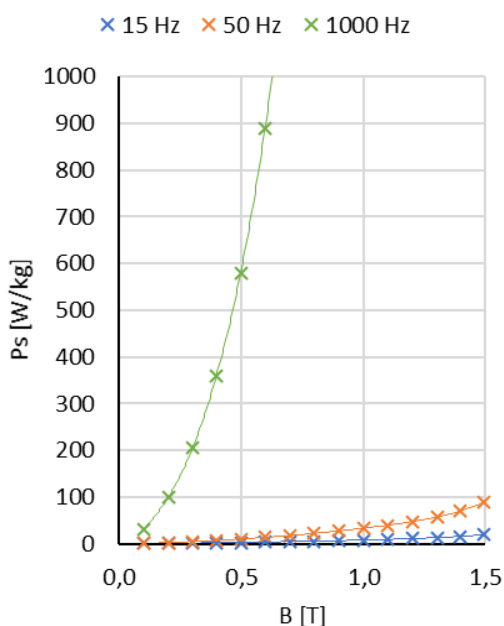
Obr. 3.14 Magnetizační křivky při kvazistatickém měření; materiál 42CrMo4



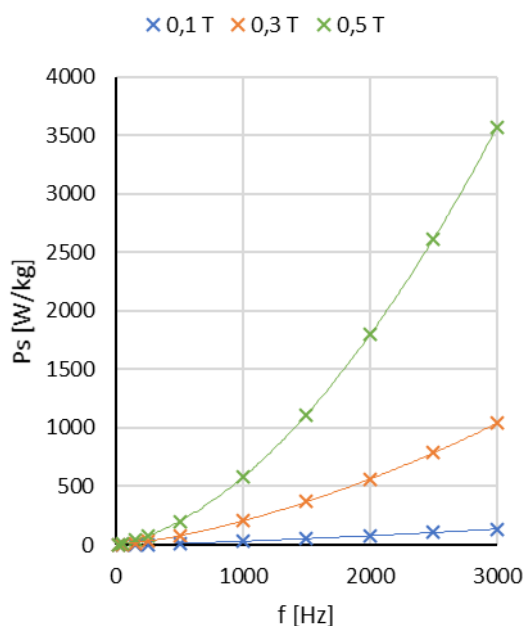
Obr. 3.15 Magnetizační křivky při kvazistatickém měření Vzorek V1 válcován a následně žhán; materiál 42CrMo4

Kromě materiálu 42CrMo4 byl změřen také materiál 41CrMo4, který vykazoval obdobné hodnoty jako předchozí materiál. Na Obr. 3.16 a Obr. 3.17 jsou zobrazeny celkové magnetické ztráty s různým sycením na zvolených frekvencích. V obou

případech jsou závislosti exponenciální a se vzrůstající frekvencí exponenciálně větší. Hysterezní křivka se vzrůstající frekvencí nebo sycením se postupně rozšiřuje a deformuje svůj tvar. Příčinou této deformace jsou jednak vzrůstající hysterezní ztráty a také i ztráty vířivé, které se zvyšují s kvadrátem napájecí frekvence.



Obr. 3.16 Celkové magnetické ztráty v závislosti na buzení, materiál 41CrMo4



Obr. 3.17 Celkové magnetické ztráty v závislosti na frekvenci, materiál 41CrMo4

3.2.2 Feritové magnety HTY45E

Ferity patří mezi cenově nejdostupnější magnety a jsou použity i v uvažovaném synchronním reluktančním motoru s permanentními magnety. Výrobce motoru zvolil typ magnetů HTY45E.

Testovaný vzorek bylo nutné před každým měřením namagnetovat, aby nedošlo k jeho úplné demagnetizaci, při opakovaném měření. Tímto měřením není možné zjistit stav feritového materiálu použitého přímo v elektrickém stroji, ale dá se s ním zjistit kvalita poskytnutého materiálu. Zjištěné hodnoty magnetických parametrů testovaného materiálu jsou srovnávány v Tabulka 3.5 s hodnotami poskytnutými výrobcem. Vzorky pro magnety byly připraveny vodním paprskem, aby jejich magnetizace byla ovlivněna co nejméně. Změřené hodnoty se od dat poskytovaných výrobcem výrazně lišily. Testovací vzorky nebyly úplně ideální a vzhledem k použitému testovacímu přípravku měly být rozměrově větší, ale takové množství testovaného materiálu nebylo bohužel k dispozici. Nelze ovšem vyloučit i chybu ze strany výrobce, kdy dodal špatnou šarži objednaných magnetů.

Kromě měření na Permagrafu byl materiál HTY45E přeměřován i na vibračním magnetometru PPMS v pokojové teplotě 20 °C a při teplotě 80 °C. U testovaného vzorku na PPMS byla nejprve proměřena celá hysterezní křivka a následně se

provádělo testování vlivu kolísání magnetického pole kolem určité hodnoty. Vždy byla nastavená jedna výchozí hodnota a pole se měnilo v rozsazích ± 500 Oe nebo ± 750 Oe. Žádná výraznější odchylka při tomto testování nebyla zjištěna. Křivka vždy lineárně rostla nebo klesala po téměř stejné cestě. Výjimkou bylo pouze pokud klesající křivka narazila na hranici původní hlavní hysterezní křivky a proběhla demagnetizace. Z naměřených hodnot je patrné, že je vhodné znát velikost každé změny magnetického pole při běhu motoru s permanentními magnety. Magnet po prvním zapnutí elektrického stroje teprve najde svůj pracovní bod a až poté vykazuje stabilní parametry.

3.3 SIMULACE RELUKTANČNÍHO MOTORU S MAGNETY

Při návrhu elektrického stroje a přípravě jeho konstrukce je vhodné použít simulační program, ve kterém je možné alespoň orientačně zjistit výsledné vlastnosti konstruovaného stroje. Pokud je simulace dobře nastavená včetně vstupních dat, tak se získané výsledky zpřesňují a odpovídají realitě i bez větších empiricky získaných korekčních koeficientů. Mezi nejznámější software pro simulaci elektrických strojů lze použít program Ansys Maxwell. Jako každý simulační program, tak i tento přijímá řadu zjednodušení v geometrickém modelu i materiálových vlastnostech.

Před simulací požadovaného stroje byl program otestován na různé druhy modelů i zadaných materiálových vlastností. Výraznější odchylka byla zjištěna u materiálových vlastností a aproximací ztrátových křivek, které se bez uživatelského zásahu mohou v některých případech výrazně lišit od reality na vyšších frekvencích, a proto je vhodné vkládaná data adekvátně upravit.

3.3.1 Porovnání simulace s reálným měřením

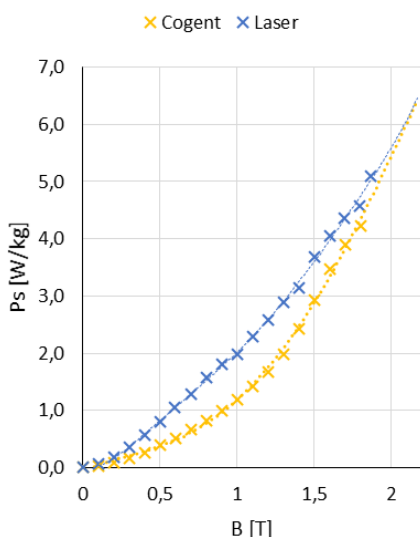
Pro ověření zjištěných zhoršených vlastností materiálu vlivem výroby v reálné aplikaci byl vybrán synchronní reluktanční motor s permanentními magnety. Stroj byl původně navržen a vyroben společností zabývající se výrobou elektrických strojů a používající simulační program Femag, který slouží pro výpočet dvourozměrných statických nebo transientních změn elektromagnetických polí v elektrických strojích [38]. Vyrobený stroj byl danou společností změřen, ale nevyhověl požadovaným parametrům. Všemi možnými příčinami proč daný stroj nevyhověl, se zabývá článek [39]. V článku je zmíněných několik pravděpodobných příčin, které vedly k nevyhovujícím výstupním parametrům stroje, ale zde se budeme podrobněji zabývat pouze vlivem opracování materiálu plechů a vlastnostmi permanentních magnetů. Zjištění vlivu materiálu pouze zpřesňuje vlastní výpočet, aby nebylo nutné používat korekční koeficienty o vysoké hodnotě. Testovaný stroj měl následující štítkové parametry – 8 pólů, výkon 1700 W, moment 6,7 Nm, jmenovitý proud 4,4 A, frekvenci 163,3 Hz a otáčky motoru 2450 min⁻¹. Vlastní porovnání je založeno na hodnotách z měření poskytnutých výrobcem včetně jeho výsledků simulace v programu Femag a vlastní simulací provedenou v Ansys Maxwell na základě změřených vlastností materiálů. Materiálové hodnoty byly

získány vlastním měřením nebo na základě dalších veřejně přístupných zdrojů. Používané hodnoty permanentního magnetu HTY45E použitého v testovaném rotoru lze najít v Tabulka 3.5. Hodnoty od výrobce magnetů poskytnuté výrobcem motoru pro 20 °C a pro 80 °C jsou označené modře a jsou získané z interních poskytnutých datasheetů. Na základě těchto vlastností prováděl výrobce vlastní prvotní simulace. V kulatých závorkách jsou minimální garantované hodnoty a typická hodnota magnetování je mimo závorku. Červeně označené hodnoty jsou vlastní změřená data na přístroji PermaGraph. Zeleně označené hodnoty vlastností permanentního magnetu byly získané z článku [40] a byly měřené na obdobném přístroji i při teplotě 80°C.

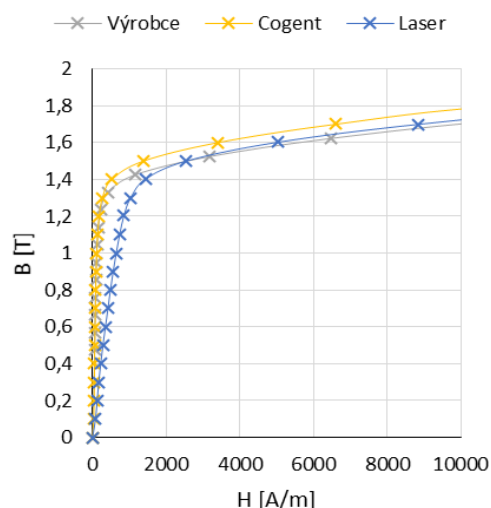
Tabulka 3.5 Parametry použitého magnetu HTY45E

HTY45E	Výrobce – zadáno $\vartheta = 20\text{ °C}$	Měřeno – čtverec $\vartheta = 20\text{ °C}$	Měřeno – kolečko $\vartheta = 20\text{ °C}$	Výrobce – zadáno $\vartheta = 80\text{ °C}$	Článek [40] $\vartheta = 20\text{ °C}$	Článek [40] $\vartheta = 80\text{ °C}$	
B_r	430 (420)	479	443	380	424	374	mT
H_c	330 (318)	261	256	288	325	290	kA/m
$(BH)_{\max}$	35 (33,5)	44	38	–	–	–	kJ/m ³
μ_r	1,03691 (1,05102)	1,460445	1,377063	1,049981	1,03818	1,026275	
ρ				1,0E+10			$\mu\Omega\cdot\text{cm}$
σ				0,01			S·m

Materiál plechů použitých v magnetickém obvodu byl M330-35A. Požadovaného tvaru bylo dosaženo laserováním, a proto došlo k výraznému ovlivnění tvaru hysterezní křivky. Data byla použita z měření na laserovaném toroidním vzorku se šířkou mezikružní 6,5 mm. Rozdíly v použitých křivkách magnetických ztrát a magnetizací lze vidět na následujících obrázcích Obr. 3.18, Obr. 3.19.

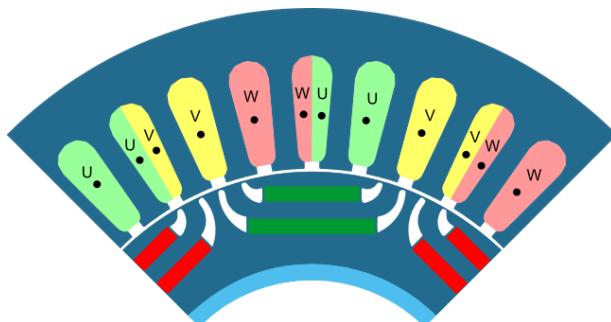


Obr. 3.18 Srovnání použitých materiálů – celkové magnetické ztráty, M330-35A



Obr. 3.19 Srovnání použitých materiálů – magnetizační křivky, M330-35A

Ukázka řezu plechu testovaného motoru s vinutím lze vidět na Obr. 3.20. Jak je vidět na obrázku, tak mezi nejkritičtější místa v magnetickém obvodu patří prostor okolo reluktančních mezer s magnety, povrchová vrstva rotoru a vzduchová mezera, která se podílí významnou měrou na velikosti produkovaného elektromagnetického momentu.



Obr. 3.20 Model testovaného motoru s upraveným rotorem i statorem [39]

Výsledné srovnání různých simulací s měřením lze nalézt v Tabulka 3.6. Porovnání je provedeno pro hodnoty získané měřením a simulací výrobce v programu Femag doplněné o různé simulacemi v programu Ansys Maxwell, kde se testoval vliv použití různých materiálů plechů nebo magnetů. Vlastnosti plechů byly použity od výrobce Sura Cogent nebo změřené na vlastním toroidním vzorku, připraveného laserováním. U magnetů byly zvoleny 3 sady parametrů a to změřeno za studena při 20 °C a 80 °C poskytnutých výrobcem motoru na základě datasheetu jejich dodavatele materiálů. Další hodnoty magnetů byly z vlastního měření při 20 °C nebo získané z článku [40] pro teplotu 80 °C.

Srovnání simulací pro stejné vstupní parametry mezi programem Femag a Maxwell nevyšlo úplně stejně protože parametry použitého plechu nebyly úplně stejné jako u výrobce. Ansys Maxwell byl nastaven do přibližně stejného pracovního bodu, ale k úplné shodě se s používaným počátečním úhlem natočení nedospělo. V rámci simulace ve Femagu byly také zahrnuty korekční činitele, které nejsou v Maxwellu nastavené, a proto simulace v Maxwellu vykazuje lepší účinnost i účinník.

Na základě výsledných hodnot z Tabulka 3.6 je patrné, že kvalita a parametry materiálu plechů mají vliv na velikost fázového napětí, účinnosti i momentu. Materiálové vlastnosti magnetů se podílí nejvíce na velikosti momentu a účinníku testovaného stroje. Velikost celkových ztrát byla při použití laserovaného plechu přibližně o 20% větší. Toto zvýšení ovšem stále nevypovídá o skutečné hodnotě ztrát. Zadané ztrátové křivky včetně magnetizační křivky byly použity pouze pro jeden typ měřeného toroidního vzorku s tloušťkou mezikruží 6,5 mm. Jak bylo ukázáno v předchozích kapitolách, tak zkreslení vlivem výroby vzrůstá s přibližujícími se řeznými hranami. Pro zvolený stroj nebylo bohužel možné získat více variant toroidních vzorků s různými geometrickými rozměry. V případě změření minimálně tří různých variant toroidních vzorků, odvozených od geometrie navrženého motorového plechu, by došlo k dalšímu zpřesnění simulace.

Tabulka 3.6 Srovnání výsledných parametrů reluktančního motoru

Zdroje dat – plechy	Cogent – datasheet			Laser – změřeno			Výrobce měřeno	Simulace výrobce	
Zdroje dat – magnet	Výrobce	Článek	Datasheet	Výrobce	Článek	Datasheet			
B (vzduchová mezera)	0,633	0,633	0,637	0,592	0,591	0,596			T
Napětí/fáze	181,5	181,5	181,3	169,3	169,3	169,2	165,8	181,5	V
Moment	6,822	6,790	7,193	6,351	6,319	6,717	5,460	6,745	Nm
Příkon	1896	1888	1991	1785	1776	1878			W
Výkon na hřídeli	1750	1742	1845	1629	1621	1723			W
Ztráty v železe	34,4	34,2	34,3	41,3	41,3	41,3			W
Účinník	0,762	0,759	0,801	0,767	0,763	0,807	0,740	0,746	
Účinnost	92,31	92,28	92,69	91,30	91,26	91,74	86,20	91,00	%
Teplota magnetů	80	80	20	80	80	20	119,8	80	°C

Pro zpřesnění simulace a odfiltrování vlivu permanentních magnetů byl také nasimulován stroj bez permanentních magnetů. Bez jejich posilujícího vlivu sice došlo k výraznému poklesu vytvářeného momentu, ale je zde lépe vidět vliv výroby na materiál plechů viz Tabulka 3.7. U stroje s laserovanými plechy došlo ke zhoršení všech sledovaných parametrů v relativní odchylce od 2,3 do 18,3 %. Největší odchylka byla zjištěna dle předpokladů u celkových magnetických ztrát v železe. Použití materiálu s nevhodně změřenými parametry se může projevit v poklesu účinnosti o 2-3 % a následnému nevyhovění třídě účinnosti pro kterou byl stroj navržen.

Tabulka 3.7 Srovnání parametrů reluktančního motoru bez permanentních magnetů

Zdroj dat – plechy	Cogent – datasheet	Laser – změřeno	Odchylka
B (vzduchová mezera) [T]	0,681	0,641	5,9 %
Napětí/fáze [V]	197,5	186,6	5,5 %
Moment [Nm]	3,96	3,55	10,3 %
Příkon [W]	1164	1071	8,0 %
Výkon na hřídeli [W]	1014	912	10,1 %
Ztráty v železe [W]	38,5	45,6	18,3 %
Účinník [–]	0,431	0,419	2,8 %
Účinnost [%]	87,16	85,13	2,3 %

4 ZÁVĚR

Tato dizertační práce pojednává o důležitosti měření vlastností používaných materiálů při návrzích speciálních elektrických strojů. Při běžném provozu elektrického stroje není většinou nutné znát přesné parametry materiálu, ale jakmile je stroj používán nestandardně nebo ve speciálních aplikacích, tak důležitost těchto znalostí vzrůstá. V rámci této práce bylo stanoveno několik cílů, jejichž řešením se došlo k těmto závěrům.

Pro magnetická měření lze použít několik různých tvarů testovacích vzorků s různou velikostí přesnosti daného měření. Mezi nejpoužívanější patří měření s uzavřeným magnetickým obvodem, jenž představuje Epsteinův rám a toroidní vzorek. Výhodou Epsteinova rámu je standardizované měření, ale nevýhodou je obtížné měření na vyšších frekvencích a nerovnoměrné rozložení magnetického pole v rozích magnetického obvodu. Vzdálenost řezných hran je u Epsteinova rámu fixně daná a není možné provádět měření na různých vzdálenostech řezných hran. Toroidní vzorek umožňuje libovolnou volbu jeho velikosti, ale je vhodné se co nejvíce přiblížit čtvercovému průřezu. Celková velikost toroidu se dále odvíjí od velikosti požadovaného elektrického stroje. Je nutné počítat s adekvátním napájecím zdrojem, aby bylo možné vždy testovaný vzorek vybudit na požadovanou velikost magnetické indukce a také zajistit, aby se vzorek nepřehříval. Za adekvátní je možné považovat ještě vzorek okolo vnějšího průměru 120 mm. Na toroidních vzorcích je možné dosahovat vyšších frekvencí buzení díky větší variabilitě volby počtu sekundárních závitů.

Magnetické vlastnosti materiálů ovlivňují různé druhy výroby a je vhodné znát velikost takového ovlivnění. V rámci práce byl testován vliv výroby ražením na lisu, řezáním pomocí laseru, vodního paprsku a elektrojiskrové řezání. Nejvýrazněji testované parametry ovlivňovalo řezání pomocí laseru. Menší odchylka od hodnot z výrobních listů výrobce byla naměřena u ražení pomocí lisu a nejméně materiál ovlivňovalo elektrojiskrové a vodní řezání. U vodního paprsku je ovšem nutné počítat s dodatečnou úpravou řezné hrany, která je velmi hrubá a pórovitá (velké otřepy), což zkresluje magnetické měření a snižuje celkové plnění železa ve svazku stroje. Vlivy výroby je možné odstranit dvěma způsoby. Jednou z možností je broušením řezné hrany minimálně o 0,2 mm, aby se odstranila nejvíce ovlivněná vrstva materiálu včetně indukovaného pnutí (tepelného i mechanického). Broušení je nutné samozřejmě provádět nízkou rychlostí nebo s adekvátním chlazením, aby nedocházelo k zahřívání testovaného vzorku. Dražší alternativou k broušení řezných hran je tepelné zpracování hotového plechu žíháním ve vakuu. Zde je ovšem nutné znát přesný typ použité izolace daného plechu. Vzorky byly testovány při teplotách 500 °C, 650 °C a 750 °C při různých časech a zlepšení vykazaly všechny testované vzorky. Zlepšení se zvětšovalo také s vzrůstající teplotou žíhání. Bez uvolnění indukovaného pnutí v materiálu je nutné počítat s horšími magnetickými parametry. Obzvláště zhoršené parametry lze očekávat u laserovaných plechů při magnetické indukci okolo 1 T, kde je velikost celkových

magnetických ztrát až dvojnásobná. Samozřejmostí je volba šířky testovaného magnetického obvodu podle uvažovaného geometrického návrhu elektrického stroje.

Při magnetickém měření plného materiálu se velmi obtížně volí velikost testovaného vzorku, protože s jeho zvětšující se velikostí exponenciálně rostou i magnetické ztráty, které jsou výrazně ovlivněny vířivou složkou. Vzhledem k použití těchto materiálů u vysokootáčkových strojů je vhodné provádět měření i při vyšší frekvenci, kde se opět projevují výrazné ztráty vlivem vířivých proudů. Velikost vzorků u těchto měření je proto většinou kompromisem mezi adekvátní velikostí testovaného vzorku a menším vzorkem v důsledku omezení od napájecího zdroje. Příliš malý průřez testovaného vzorku způsobuje chování materiálu podobné jako při měření pouze jednoho plechu a příliš velký průřez je díky vysoké hodnotě ztrát pro vyšší sycení nezměřitelný. U těchto typů toroidních měření je nutné provádět měření s maximální rychlostí, aby nedošlo k ohřevu testovaného vzorku. Optimální velikostí tloušťky magnetického obvodu je hodnota přibližně 6-10 mm, pro používaný hysteresisgraf RemaCOMP a RemaGRAPH.

Největší potenciál pro využití změřených vlastností materiálů mají reluktanční a vysokootáčkové motory. V této práci byla zvolena aplikace změřených dat a ověření změny výstupných parametrů u reluktančního motoru s permanentními magnety. Materiál plechů M330-35A byl přeměřen po vyřezání laserovým paprskem a zjištěné hodnoty zadány do simulace v programu Ansys Maxwell. Vzhledem k tomu, že motor obsahoval i permanentní magnety, tak byly změřeny i jejich parametry pro teplotu 20 °C na zařízení PermaGRAPH a také na vibračním magnetometru PPMS. Použité měřicí zařízení PermaGRAPH bohužel neobsahovalo dodatečné vyhřívání měřicích pólových nástavců, takže magnety byly přeměřeny pouze při teplotě 20 °C, ale do simulace byly zadány i parametry zjištěné na základě literatury pro 80 °C. Během měření na vibračním magnetometru bylo ověřeno, že během reakce kotvy dochází ke snížení remanentní magnetické indukce, ale nevytváří se žádné hysterezní křivky a tím pádem se negenerují žádné hysterezní ztráty v magnetech během chodu motoru. Tvorba vířivých ztrát je omezena vysokou rezistivitou materiálu, takže k ohřevu magnetů nemohlo dojít vlivem generování ztrát uvnitř magnetů. Vlastnosti materiálu plechů ovlivňují všechny sledované parametry, mezi které patří indukované napětí na fázi při proudovém napájení stroje, velikost celkových magnetických ztrát, velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře, účinníku, a účinnosti.

V rámci dalšího pokračování práce by bylo možné se zaměřit více na měření vlastností magnetů při vystavení magnetickému poli o různých frekvencích a přeměřit velikost jejich ztrát v kalorimetrické komoře. Magnetický obvod elektrického stroje může být během přípravy ovlivněn i dalšími vlivy, a proto je vhodné sledovat změnu materiálových vlastností v jednotlivých krocích konstrukce daného stroje. Mezi další vlivy ovlivňující magnetické parametry patří např. lisování a svařování svazků plechů při kompletování celého stroje. Navíc se v elektrickém stroji kromě časově proměnlivého magnetického pole vyskytuje i rotující magnetické pole, které může způsobovat další dodatečné ztráty.

LITERATURA

- [1] FIORILLO, Fausto. Measurements of magnetic materials. *Metrologia* [online]. 2010, **47**(2), S114–S142. ISSN 0026-1394. Dostupné z: doi:10.1088/0026-1394/47/2/S11
- [2] BALI, Madeleine, Herbert De GERSEM a Annette MUETZE. Epstein Frame Measurement Based Determination of Original Non-Degraded and Fully Degraded Magnetic Properties of Material Submitted to Mechanical Cutting. 2015, 1184–1189.
- [3] APPINO, C., E. FERRARA, F. FIORILLO, L. ROCCHINO, C. RAGUSA, J. SIEVERT, T. BELGRAND, C. WANG, P. DENKE, S. SIEBERT, Y. NORNGREN, K. GRAMM, S. NORMAN, R. LYKE, M. ALBRECHT, X. ZHOU, W. FAN, X. GUO a M. HALL. International comparison on SST and Epstein measurements in grain-oriented Fe-Si sheet steel. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* [online]. 2015, **48**(2,3), 123–133. ISSN 13835416. Dostupné z: doi:10.3233/JAE-151978
- [4] FREITAG, C., C. JOOST a T. LEIBFRIED. Modified Epstein frame for measuring electrical steel under transformer like conditions. *ICHVE 2014 - 2014 International Conference on High Voltage Engineering and Application* [online]. 2015, 2–5. Dostupné z: doi:10.1109/ICHVE.2014.7035441
- [5] BROŽ, Jaromír. *Základy fyzikálních měření*. 1. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1967.
- [6] MANESCU, Veronica, Gheorghe PALTANEA a Horia GAVRILA. Some Important Effects of the Water Jet and Laser Cutting Methods on the Magnetic Properties of the Non-oriented Silicon Iron Sheets. 2015, 452–455.
- [7] ODA, Yoshihiko, Hiroaki TODA, Nobuo SHIGA, Shoji KASAI a Tatsuhiko HIRATANI. Effect of Si Content on Iron Loss of Electrical Steel Sheet Under Compressive Stress. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2014, **50**(4), 1–4. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2013.2290321
- [8] SHI, Wenmin, Jing LIU a Changyi LI. Effect of cutting techniques on the structure and magnetic properties of a high-grade non-oriented electrical steel. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* [online]. 2014, **29**(6), 1246–1251. ISSN 1000-2413. Dostupné z: doi:10.1007/s11595-014-1076-3
- [9] ARAUJO, Edgar Gomes, Jürgen SCHNEIDER, Kim VERBEKEN, Giuseppe PASQUARELLA a Yvan HOUBAERT. Dimensional Effects on Magnetic Properties of Fe-Si Steels Due to Laser and Mechanical Cutting. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2010, **46**(2), 213–216. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2009.2034124
- [10] MANESCU, Veronica, Gheorghe PALTANEA, Horia GAVRILA a Ioan PETER. The influence of punching and laser cutting technologies on the magnetic properties of non-oriented silicon iron steels. *2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering, ISFEE 2014* [online]. 2015, 3–6. ISSN 00354066. Dostupné z: doi:10.1109/ISFEE.2014.7050611
- [11] SIEBERT, R., J. SCHNEIDER a E. BEYER. Laser Cutting and Mechanical Cutting of Electrical Steels and its Effect on the Magnetic Properties. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2014, **50**(4), 1–4. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2013.2285256
- [12] TONKOVIČ, Miroslav. *Analýza materiálu pro laserové řezání*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVA. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2nd vyd. B.m.: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.
- [14] SHEN, J, X QIN a Y WANG. High-speed permanent magnet electrical machines —

- applications, key issues and challenges. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems* [online]. 2018, 2(1), 23–33. ISSN 2096-3564 VO - 2. Dostupné z: doi:10.23919/TEMS.2018.8326449
- [15] MUSUROI, S., C. SORANDARU, M. GRECONICI, V. N. OLARESCU a M. WEINMAN. Low-cost ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance rotor an alternative solution for rare earth permanent magnet synchronous motors. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)* [online]. 2013, 2966–2970. ISSN 1009-637X, 1861-9568. Dostupné z: doi:10.1109/IECON.2013.6699602
- [16] MOHANARAJAH, T., M. NAGRIAL, J. RIZK a A. HELLANY. Permanent Magnet Optimization in PM Assisted Synchronous Reluctance Machines. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* [online]. 2018, **2018-June**, 1347–1351. Dostupné z: doi:10.1109/ISIE.2018.8433589
- [17] PYRHONEN, Juha, Sami RUOHO, Janne NERG, Martti PAJU, Sampo TUOMINEN, Harri KANKAANPÄÄ, Raivo STERN, Aldo BOGLIETTI a Nikita UZHEGOV. Hysteresis losses in sintered NdFeB permanent magnets in rotating electrical machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2015, **62**(2), 857–865. ISSN 02780046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2014.2354597
- [18] PETROV, Ilya, Dmitry EGOROV, Joosep LINK, Raivo STERN, Sami RUOHO a Juha PYRHÖNEN. Hysteresis Losses in Different Types of Permanent Magnets Used in PMSMs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2017, **64**(3), 2502–2510. ISSN 02780046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2016.2548440
- [19] EGOROV, Dmitry, Ilya PETROV, Joosep LINK, Raivo STERN a Juha PYRHONEN. Model-Based Hysteresis Loss Assessment in PMSMs with Ferrite Magnets. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2017. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2017.2714121
- [20] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřící technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. Brno: VUTIU, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [21] *Computer controlled Remagraph-Remacomp-combination C-705/710 (Hysteresisgraph)*. 2011.
- [22] FIORILLO, Fausto. *Measurement and characterization of magnetic materials*. B.m.: Elsevier B.V., 2004. ISBN 978-0-12-257251-7.
- [23] *Computer controlled PERMAGRAPH C - 300 (Hysteresisgraph)*. 2008.
- [24] *Ansys Maxwell EM 16.0 online help*
- [25] *Ansys Maxwell 2D user's guide* [online]. 2012 [vid. 2018-07-31]. Dostupné z: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D_V15.pdf
- [26] MACH, Martin. *Analýza ztrát asynchronních motorů malého výkonu*. Brno, 2015. Vysoké učení technické.
- [27] NOVAK, Gašper, Janko KOKOŠAR, Aleš NAGODE a Darja Steiner PETROVIČ. Core-loss prediction for non-oriented electrical steels based on the steinmetz equation using fixed coefficients with a wide frequency range of validity. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2015, **51**(4). ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2014.2354317
- [28] *Remacomp C* [online]. [vid. 2018-07-19]. Dostupné z: <https://www.magnet-physik.de/upload/18657996-4.pdf>
- [29] STEENTJES, S, K HAMEYER, S VOGT, M BEDNARZ, W VOLK, J DIERDORF a G HIRT. Influence of material processing steps annealing and cutting on magnetic materials ' properties relevant for electrical machine design. *Forming Technology Forum*. 2013.
- [30] BULÍN, T., E. ŠVÁBENSKÁ, M. HAPLA, Č. ONDRŮŠEK a O. SCHNEEWEISS. Changes in electrical steel sheets induced by heat treatment. In: *METAL 2017 - 26th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2017. ISBN 9788087294796.

- [31] SHI, Wenmin, Jing LIU a Changyi LI. Effect of cutting techniques on the structure and magnetic properties of a high-grade non-oriented electrical steel. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* [online]. 2014, **29**(6), 1246–1251. ISSN 1000-2413. Dostupné z: doi:10.1007/s11595-014-1076-3
- [32] SALINAS-BELTRÁN, J., A. SALINAS-RODRÍGUEZ, E. GUTIÉRREZ-CASTAÑEDA a R. DE AQUINO LARA. Effects of processing conditions on the final microstructure and magnetic properties in non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2016, **406**, 159–165. ISSN 03048853. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmmm.2016.01.017
- [33] Electrical steel non oriented fully processed. *Cogent* [online]. 2002 [vid. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/ELEC2311/T2006/NOFP.pdf>
- [34] *Acroni d.o.o* [online]. 2014 [vid. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.acroni.si/en/>
- [35] ELDIEB, Asheraf, Fatih ANAYI a Ashraf FAHMY. Investigation of short-circuit fault effects on non-oriented steel at different range of magnetisations. *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference* [online]. 2015. Dostupné z: doi:10.1109/UPEC.2015.7339881
- [36] LINDENMO, M., A. COOMBS a D. SNELL. Advantages, properties and types of coatings on non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2000, **215**, 79–82. ISSN 03048853. Dostupné z: doi:10.1016/S0304-8853(00)00071-8
- [37] COOMBS, Alan, M. LINDENMO, D. SNELL a D. POWER. Review of the types, properties, advantages, and latest developments in insulating coatings on nonoriented electrical steels. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2001, **37**(1), 544–557. ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/20.914376
- [38] *ProFEMAG The FE-Program for electrical machines* [online]. [vid. 2018-07-23]. Dostupné z: https://www.profemag.ch/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=240&lang=en
- [39] KNEBL, Ladislav, Cestmir ONDRUSEK a Jiri KURFÜRST. Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Motor Design , Manufacturing and Material Influence on Motor Characteristics. In: *2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)* [online]. Brno: IEEE, 2018, s. 1–6. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8624697>
- [40] HAGNESTAL, A. On the optimal pole width for direct drive linear wave power generators using ferrite magnets. *Energies* [online]. 2018, 1–24. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en11061356

CURRICULUM VITAE AUTORA

Ing. Tomáš Bulín

Email: tomas.bulin@gmail.com

Narozen: 4. 2. 1990 ve Znojmě

Vzdělání:

2009 – probíhá	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky
2005–2009	Gymnázium Dr. Karla Polesného Znojmo

Stáž

2011	Letní univerzita Dukovany
------	---------------------------

Pracovní zkušenosti:

2014 – probíhá	Technický pracovník , Výzkumné centrum speciálních elektrických strojů, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
2014 – probíhá	Technický pracovník , Skupina elektrických a magnetických vlastností, Ústav fyziky materiálů Akademie věd České republiky, v. v. i.

Datum: 5. 6. 2019

Tomáš Bulín

ANOTACE

Tato práce se zabývá analýzou magnetických ztrát v elektrických strojích a možnostmi jejich měření. Magneticky měkké i tvrdé materiály jsou velmi náchylné na změnu magnetických vlastností. Lze je měnit pouhou změnou teploty materiálu nebo indukováním různého pnutí uvnitř materiálu a díky tomu dosáhnout rozdílných výsledků. Tyto změny je důležité mít na paměti při návrhu elektrického stroje. Původní parametry v ovlivněných materiálech lze obnovit opětovným vystavením magnetickému poli, žíháním nebo broušením. Zmíněné metody uvolňují indukované pnutí uvnitř materiálu. Kromě analyzování těchto vlivů je důležité znát i způsob měření magnetických parametrů. Každý způsob má svá specifika a zanáší do měření určitou chybu. Při konstrukci stroje pro vyšší účinnosti, vyšší otáčky nebo vyšší teploty je vhodné vědět, jak se magnetické vlastnosti změní. Tato práce pojednává o vlastnostech různých materiálů, jejich měření, a nakonec i aplikaci zjištěných výsledků na zvoleném elektrickém stroji.

ABSTRACT

This thesis deals with the analysis of magnetic losses in electrical machines and the possibilities of their measurement. Magnetically soft and hard materials are very prone to changing magnetic properties. They can be changed simply by changing the temperature of the material or different stresses induced in the material, resulting in different results. These changes are important to keep in mind when an electric machine is being designed. The original parameters of the affected materials can be restored by annealing or grinding. These methods release the induced stresses within the material. Due to these effects, it is also important to know how to measure magnetic parameters. Each way has its own specifics and has a certain error of the measurement. When the machines for higher efficiency, rpm or higher temperatures are designed, it is advisable to know how their magnetic properties changed. This thesis deals with the properties of different materials, their measurements and finally simulation of the chosen electric machine with the application of the measured results.