



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**ANALÝZA ZTRÁT V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH
PŘI NESTANDARDNÍCH PODMÍNKÁCH**

LOSSES ANALYSIS IN ELECTRIC MACHINES UNDER SPECIAL CONDITIONS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Tomáš Bulín

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

BRNO 2019

Abstrakt

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.

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.

Bibliografická citace

BULÍN, Tomáš. *Analýza ztrát v elektrických strojích při nestandardních podmínkách*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121364>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Čestmír Ondrůšek.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou dizertační práci na téma Analýza ztrát v elektrických strojích při nestandardních podmínkách jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu dizertační práce doc. Ing. Čestmíru Ondrůškovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé dizertační práce.

V Brně dne

Podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
ÚVOD	15
1 DOSAVADNÍ VÝVOJ	16
1.1 TYPY ZTRÁT V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH.....	16
1.2 ZPŮSOBY MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ	16
1.2.1 EPSTEINŮV RÁM.....	16
1.2.2 TOROID	17
1.2.3 OTEVŘENÝ VZOREK	17
1.2.4 VIBRAČNÍ MAGNETOMETR.....	18
1.3 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI DYNAMOPLECHŮ	18
1.4 PLNÝ MATERIÁL.....	19
1.5 VLASTNOSTI MAGNETICKY TVRDÝCH MATERIÁLŮ	19
2 CÍLE DIZERTACE	20
3 TEORETICKÝ ROZBOR	21
3.1 MAGNETICKÉ MATERIÁLY	21
3.1.1 MAGNETICKY MĚKKÉ MATERIÁLY (FEROMAGNETIKA).....	22
3.1.2 MAGNETICKY TVRDÉ MATERIÁLY	23
3.2 PRINCIP MAGNETICKÝCH MĚŘENÍ.....	24
3.3 MĚŘENÍ MAGNETICKY MĚKKÝCH MATERIÁLŮ	26
3.3.1 STATICKÁ HYSTEREZNÍ KŘIVKA	27
3.3.2 DYNAMICKÁ HYSTEREZNÍ KŘIVKA.....	27
3.4 MĚŘENÍ MAGNETICKY TVRDÝCH MATERIÁLŮ	29
3.5 MAGNETICKÝ SKINEFEKT	29
3.6 EKVIVALENTNÍ VÍŘIVÝ ODPOR JÁDRA.....	31
3.7 KOMPLEXNÍ PERMEABILITA	32
3.8 VÝPOČTY V ANSYS MAXWELL.....	34
3.8.1 VÝPOČTY POLÍ	36
3.8.2 VÝPOČET CELKOVÝCH MAGNETICKÝCH ZTRÁT	37
4 ŘEŠENÍ.....	40
4.1 CHYBA MAGNETICKÝCH MĚŘENÍ	40
4.1.1 ROZLOŽENÍ VINUTÍ	45
4.1.2 VLIV ROZPTYLU A VZDUCHOVÉ MEZERY.....	47
4.1.3 VLIV CHYBNĚ ZADANÝCH VSTUPNÍCH PARAMETRŮ	49

4.1.4 VÝSLEDKY OPAKOVANÉHO MĚŘENÍ.....	53
4.1.5 VLIV VELIKOSTI PRŮŘEZU NA MAGNETICKÉ VLASTNOSTI.....	54
4.2 VLIV ZPŮSOBU VÝROBY NA MAGNETICKÉ VLASTNOSTI.....	56
4.2.1 SROVNÁNÍ MĚŘENÍ JEDNOHO MATERIÁLU NA RŮZNÝCH MEZIKRUŽÍCH	57
4.2.2 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU PO OPRACOVÁNÍ RŮZNÝMI METODAMI	60
4.2.3 RŮZNÉ ZPŮSOBY VÝROBY A VLIV TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA MAGNETICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU.....	63
4.2.4 POŠKOZENÍ IZOLACE VLIVEM TEPLoty	65
4.3 MĚŘENÍ PLNÉHO MATERIÁLU	69
4.3.1 SROVNÁNÍ RŮZNÝCH TLOUŠTĚK MEZIKRUŽÍ.....	69
4.4 SIMULACE RŮZNÝCH TVARŮ TESTOVANÝCH VZORKŮ	74
4.4.1 SIMULACE RŮZNÝCH TVARŮ VZORKU VE 2D	75
4.4.2 SIMULACE ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE VE 3D	77
4.4.3 FERITOVÉ MAGNETY HTY45E	78
4.5 SIMULACE RELUKTANČNÍHO MOTORU S MAGNETY	81
4.5.1 POROVNÁNÍ SIMULACE S REÁLNÝM MĚŘENÍM	82
5 ZÁVĚR.....	88
LITERATURA	91
PŘÍLOHA A – CHYBNĚ ZADANÉ VSTUPNÍ PARAMETRY	96
PŘÍLOHA B – SROVNÁNÍ RŮZNÝCH VELIKOSTÍ VZORKŮ	101
PŘÍLOHA C – VODA, LASER, LIS, JISKRA	104
PŘÍLOHA D – ŽÍHÁNÍ.....	108
PŘÍLOHA E – POŠKOZENÍ IZOLACE VLIVEM TEPLoty	111
PŘÍLOHA F – PLNÝ MATERIÁL 42CRMO4 A 41CRMO4.....	117
PŘÍLOHA G – SIMULACE MAXWELL	124
PŘÍLOHA H – PERMANENTNÍ MAGNETY	128

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3.1 Pohyb magnetických domén v externím poli a) $H = 0$ A/m až d) $H \gg 0$ A/m [17]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3.2 Souhrnná plocha cívký tvaru a) obdélníku b) dutého klínu [25]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.3 Měřicí stanoviště pro měření magnetických vlastností (RemaGRAPH – RemaCOMP C710).....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.4 Schématický nákres magnetického skinefektu ve vodiči [24]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3.5 Řez svazkem plechů [24]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3.6 Hloubka vniku v závislosti na vzrůstající frekvenci</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3.7 Rozložení magnetické indukce pro střední pracovní amplitudu 0,7T při různých frekvencích.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3.8 Zjednodušené náhradní zapojení</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3.9 Upřesněné základní zapojení pro přesnější výpočet komplexní permeability</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3.10 Trojúhelník.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3.11 Tetrahedron.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3.12 Porovnání BP křivek pro 50 Hz M330-35A Laser – 2 frekvence 50 a 100 Hz.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 3.13 Porovnání BP křivek pro 50 Hz M330-35A Cogent – 2 frekvence 50 a 100 Hz.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 3.14 Porovnání BP křivek pro 50 Hz M330-35A Laser – 7 frekvencí</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3.15 Porovnání BP křivek pro 50 Hz M330-35A Cogent – 5 frekvencí (Matlab upraven) ...</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3.16 Porovnání BP křivek pro 400 Hz M330-35A Laser – 7 frekvencí</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3.17 Porovnání BP křivek pro 400 Hz M330-35A Cogent – 5 frekvencí.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3.18 Porovnání BP křivek pro 1000 Hz M330-35A Laser – 7 frekvencí</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3.19 Porovnání BP křivek pro 1000 Hz M330-35A Cogent – 5 frekvencí.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4.1 Chybná BH křivka vlivem DC složky</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4.2 Ukázka navinutého Vzorku 1</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4.3 Ukázka navinutých vzorků a) Vzorek 2, b) Vzorek 3, c) Vzorek 4 a d) Vzorek 5</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4.4 Celkové magnetické ztráty v závislosti na magnetické indukci při 50 Hz.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4.5 Relativní permeabilita v závislosti na magnetické indukci při 50 Hz</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4.6 Magnetizační charakteristika při 50 Hz</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 4.7 Velikost odchylky magnetické indukce v závislosti na její nastavené velikosti.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4.8 Vzdálenost sekundárního vinutí a) 0,1 mm b) 2,0 mm + nerovnoměrné rozložení</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 4.9 Celkové magnetické ztráty pro rozdílnou výšku.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4.10 Relativní permeabilita pro rozdílnou výšku</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4.11 Magnetizační křivky pro různou výšku</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 4.12 Celkové magnetické ztráty pro rozdílnou hmotnost.....</i>	<i>51</i>

<i>Obr. 4.13</i>	<i>Hysterezní křivky pro napěťový a proudový zdroj pro 50 Hz</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 4.14</i>	<i>Časové průběhy 50 Hz pro napěťový zdroj.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 4.15</i>	<i>Časové průběhy 50 Hz pro proudový zdroj</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 4.16</i>	<i>Závislost relativní permeability na sycení po několika letech</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 4.17</i>	<i>Závislost relativní permeability na velikosti magnetické indukce na 50 Hz</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 4.18</i>	<i>Hysterezní křivky u toroidů s různým počtem plechů při 50 Hz</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 4.19</i>	<i>Srovnání magnetizačních křivek měřených výrobcem Sura při 50 Hz [44]</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 4.20</i>	<i>Srovnání relativní permeability různých plechů na základě měření výrobce Sura Cogent při 50 Hz [44]).....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 4.21</i>	<i>M250-35A (magnetické ztráty) – srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno).....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 4.22</i>	<i>M250-35A (relativní permeabilita) – srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno).....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 4.23</i>	<i>M250-35A (magnetizace) – srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno)</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 4.24</i>	<i>OM plech, raženo, leptáno, 200x zvětšeno; M470-50A.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 4.25</i>	<i>OM plech, laserové řezání, leptáno, 200x zvětšeno; M470-50A</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 4.26</i>	<i>OM plech, jiskrové řezání 1, leptáno, 200x zvětšeno; M470-50A</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 4.27</i>	<i>OM plech, jiskrové řezání 2, leptáno, 200x zvětšeno; M470-50A</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 4.28</i>	<i>Srovnání hysterezních křivek pro 50 Hz, 1,5T; M470-50A.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 4.29</i>	<i>Kvazistatická hysterezní křivka pro 1,5T; M470-50A.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 4.30</i>	<i>Celkové magnetické ztráty při 50 Hz; M470-50A.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 4.31</i>	<i>Celkové magnetické ztráty při 50 Hz; M330-35A.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 4.32</i>	<i>Velikost relativní permeability při 50 Hz; M470-50A</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 4.33</i>	<i>Velikost relativní permeability při 50 Hz; M330-35A</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 4.34</i>	<i>Magnetizační křivky při 50 Hz; M470-50A</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 4.35</i>	<i>Magnetizační křivky při 50 Hz; M330-35A</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 4.36</i>	<i>Srovnání BH křivek vzorků po obroušení 50Hz, 1,5T; M470-50A</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 4.37</i>	<i>M330-35A – Celkové magnetické ztráty při 50 Hz</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 4.38</i>	<i>M330-35A – Velikost relativní permeability při 50 Hz.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 4.39</i>	<i>M330-35A – Magnetizační křivky při 50 Hz + detail.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 4.40</i>	<i>OM 500x zvětšení, Vzorek 1</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 4.41</i>	<i>OM 500x zvětšení, Vzorek 1a.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 4.42</i>	<i>GDOES vzorek 1</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 4.43</i>	<i>GDOES vzorek 1a.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 4.44</i>	<i>Relativní permeabilita při 50 Hz pro malé a velké vzorky.....</i>	<i>67</i>

<i>Obr. 4.45 Ztráty pro malé i velké vzorky při 50 Hz.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 4.46 Komutační křivky pro malé i velké vzorky při 50 Hz</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 4.47 Magnetizační křivky při kvazistatickém měření; materiál 42CrMo4</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 4.48 Relativní permeabilita při kvazistatickém měření v závislosti na H; materiál 42CrMo4</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 4.49 Magnetizační křivky při kvazistatickém měření Vzorek V1 válcován a následně žhán; materiál 42CrMo4.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 4.50 Relativní permeabilita při kvazistatickém měření v závislosti na H; materiál 42CrMo4</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 4.51 Celkové magnetické ztráty v závislosti na buzení, materiál 41CrMo4</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 4.52 Celkové magnetické ztráty v závislosti na frekvenci, materiál 41CrMo4.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 4.53 Hysterezní křivky materiálu 41CrMo4 (15 Hz)</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 4.54 Hysterezní křivky materiálu 41CrMo4 (0.5 T).....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 4.55 Epsteinův rám bez přesahů</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 4.56 Epsteinův rám s přesahy.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 4.57 Detail rozložení magnetického pole v toroidu s určitým počtem závitů</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 4.58 Zobrazení rozložení rozptylového toku od vinutí ve vzdálenosti 0,5mm od testovaného materiálu</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 4.59 Čtvercový průřez.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 4.60 Kulatý průřez</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 4.61 Hysterezní křivka HTY45E + minoritní hysterezní křivky</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 4.62 Minoritní hysterezní křivky při výchozím poli 0 Oe.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 4.63 Velikost magnetické indukce a celkových ztrát v toroidu s vloženým magnetem SmCo do obvodu na 1,2 T.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 4.64 Varianta reluktančního motoru s hladkým rotorem.....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 4.65 Varianta reluktančního motoru s vyniklými póly.....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 4.66 Model motoru Toyota Prius – synchronní reluktanční motor s vnořenými magnety</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 4.67 Rozložení magnetické indukce v modelu motoru Toyota Prius</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 4.68 Srovnání deformované křivky po pálení laserem a křivky bez deformace M330-35A...84</i>	
<i>Obr. 4.69 Srovnání použitých materiálů – celkové magnetické ztráty, M330-35A.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 4.70 Srovnání použitých materiálů – magnetizační křivky, M330-35A.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 4.71 Srovnání použitých materiálů – relativní permeabilita, M330-35A.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 4.72 Model testovaného motoru s upraveným rotorem i statorem [51]</i>	<i>85</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 3.1 Technické parametry přípravku s integrovanými cívkami k měření magnetických vlastností magnetů [27].....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 4.1 Velikost koeficientu k_s v závislosti na počtu opakování měření n</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 4.2 Vypočtené velikosti chyb a nejistoty A pro 0,5 T.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 4.3 Vypočtené velikosti chyb a nejistoty A pro 1,0 T.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 4.4 Vypočtené velikosti chyb a nejistoty A pro 1,5 T.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 4.5 Parametry vzorků k testování kompenzace rozptylového toku.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 4.6 Vypočtené odchylky velikostí magnetické indukce B v závislosti na tloušťce izolace.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 4.7 Teoretická velikost chyby v závislosti na počtu chybných závitů při různém celkovém počtu závitů.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 4.8 Měřeno na frekvenci 50 Hz, sycení 1 T při obvyklé velikosti používaných sekundárních závitů, plech M470-50A.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 4.9 Měřeno na frekvenci 50 Hz a sycení 1 T při nízkém počtu sekundárních závitů, plech M470-50A.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 4.10 Jednotlivá data měření s počtem závitů N_1 po přemotání.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 4.11 Geometrické rozměry a vstupní parametry pro magnetické měření</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 4.12 Parametry testovaných vzorků materiálu M250-35A.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 4.13 Geometrické rozměry a vstupní parametry testovaných vzorků z materiálu 42CrMo4</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 4.14 Výsledky kvazistatického měření na materiálu 42CrMo4.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 4.15 Parametry testovaných vzorků</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 4.16 Parametrů vzorků a výsledků simulace.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka 4.17 Parametry použitého magnetu HTY45E.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 4.18 Parametry testovaného motoru</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 4.19 Parametry použitého magnetu HTY45E.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 4.20 Srovnání výsledných parametrů reluktančního motoru</i>	<i>86</i>
<i>Tabulka 4.21 Srovnání parametrů reluktančního motoru bez permanentních magnetů.....</i>	<i>87</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
a	Koeficienty polynomu	
A	Magnetický vektorový potenciál	$V \cdot s \cdot m^{-1}$
A_z	Polynom druhého řádu	
B	Magnetická indukce	T
B_{Fe}	Magnetická indukce v železe	T
B_{max}	Maximální hodnota magnetické indukce	T
B_r	Remanentní indukce	T
B_{vz}	Rozptylová magnetická indukce	T
B_z	Magnetická indukce v ose z	T
c	Šířka plechu	m
C_E	Ekvivalentní kapacita	C
C_m	Empiricky zjištěná konstanta	
d	Tloušťka plechu	m
d_{in}	Vnitřní průměr toroidu	m
D_{out}	Vnější průměr toroidu	m
E	Intenzita elektrického pole	$V \cdot m^{-1}$
f	Frekvence	Hz
f_0	Testovací frekvence	Hz
h	Výška svazku plechů	m
H	Intenzita magnetického pole	A/m
H_c	Koercivita	A/m
H_{max}	Maximální hodnota intenzity magnetického pole	A/m
i	Celkový proud	A
i_c	Proud protékající vodičem	A
i_H	Magnetizační/primární proud	A
i_v	Vířivý proud	A
I	Proud	A
I_1	Primární proud	A
I_{max}	Maximální výstupní proud	A
J	Magnetická polarizace	T

Značka	Veličina	Značka jednotky
J_I	Proudová hustota	$A \cdot m^2$
k	Dílčí pořadí v sumě	
k_s	Koeficient pro výpočet nejistoty typu A	
K_c	Koeficient vířivých ztrát	
K_e	Koeficient přídavných ztrát	
K_h	Koeficient hysterezních ztrát	
l	Délka hraniční/integrační křivky	m
l_{Fe}	Střední délka magnetického toku v obvodu	m
L	Indukčnost	H
m_a	Hmotnost měřeného vzorku	kg
N	Počet závitů cívky	
N_1	Počet primárních závitů	
N_2	Počet závitů sekundárního vinutí	
P	Polynom pro výpočet magnetických ztrát	W
P_c	Ztráty vířivými proudy	W
P_e	Přídavné ztráty	W
P_{Fe}	Ztráty v železe	W
P_h	Hysterezní ztráty	W
P_{mech}	Mechanické ztráty	W
P_s	Celkové magnetické ztráty	W/kg
P_v	Vířivý výkon/ztráty	W
q	Polovina tloušťky plechu	m
R	Odpor	Ω
R_{mxwl}	Konstanta vyjadřující velikost lokální chyby	
R_f	Tlumicí odpor	Ω
R_h	Odpor reprezentující hysterezní ztráty	Ω
R_{h0}	Hodnota odporu na rezonančním kmitočtu	Ω
R_i	Vnitřní odpor	Ω
R_{N1}	Odpor primárního vinutí	Ω
R_s	Odpor bočníku	Ω
R_v	Ekvivalentní vířivý odpor	Ω
S	Plocha	m^2
S_a	Plocha kolmá k magnetickému toku	m^2

Značka	Veličina	Značka jednotky
S_b	Plocha pod úhlem	m^2
S_{Fe}	Plocha řezu magnetického obvodu	m^2
S_{vz}	Plocha řezu vzduchové mezery	m^2
t	Čas	s
T	Perioda	s
u, U	Napětí	V
U_2	Sekundární napětí	V
u_A	Nejistota typu A	
u_B	Nejistota typu B	
U_H	Napěťový úbytek	V
u_i	Indukované napětí	V
u_m	Magnetické napětí	A
U_{max}	Napětí – amplitudová hodnota	V
V_{Fe}	Objem magnetického obvodu	m^3
x	Vzdálenost od středu tloušťky plechu	m
Z	Impedance	Ω
ΔS	Plocha dílčí plošky	m^2
$\vec{c}$	Vektor hodnot pro ztrátové koeficienty	
s_x^-	Rozptyl hodnot	
$\bar{x}$	Průměrná hodnota	
$\vec{y}$	Vektor celkových magnetických ztrát	
Z	Matice se součiny frekvence s magnetickou indukcí	
α	Úhel mezi plochou S_a a S_b	$^\circ$
γ	Hustota materiálu	kg/m^3
δ	Hloubka vniku	m
ϑ	Teplota	$^\circ C$
μ	Permeabilita materiálu	
μ_0	Permeabilita vakua	
μ_r	Relativní permeabilita	
$\mu_{r,nf}$	Relativní permeabilita pro nízké frekvence	
ρ	Měrný elektrický odpor	$\Omega \cdot m$
σ	Elektrická vodivost	S
φ	Magnetický tok	Wb

Značka	Veličina	Značka jednotky
Ψ	Spřažený tok cívky	Wb
$\Psi_{\max}$	Spřažený tok – amplituda	Wb
ω	Úhlová rychlost	rad ⁻¹
ω_0	Rezonanční kmitočet	rad ⁻¹
ω_{mez}	Mezní kmitočet	rad ⁻¹
IE1 – IE3	Účinnosti normy pro asynchronní motory	
EDX	Energetická disperzní rentgenová analýza	
$(BH)_{\max}$	Energetický součin u magnetu	kJ/m ³
GDOES	Optická emisní spektroskopie s doutnavým výbojem	
OM	Optický mikroskop	
SEM	Skenovací elektronový mikroskop	

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 jakákoliv odchylka může způsobit chybu měření. Ve své podstatě tyto standardní podmínky nenastávají u většiny používaných strojů. Velikost ztrát v elektrickém stroji ovlivňuje kromě dříve zmíněných vlivů i elektromagnetický návrh a kvalita použitého materiálu včetně způsobu jeho přípravy a obrábění. Mnohdy i na první pohled zanedbatelná úprava dokáže výrazně změnit materiálové vlastnosti a není dosažena očekávaná účinnost. 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. Nejvýznamnějším parametrem, pro který jsou měření definována, je okolní teplota. V laboratořích je tato teplota stanovena až na 25 °C [1, 3]. Tato teplota ovlivňuje nejen velikost rezistivity použitého vinutí, ale také magnetické vlastnosti materiálu. Mezi další ovlivňující faktory patří mechanické namáhání. Toto namáhání většinou vzniká při zpracování materiálu ražením do požadovaného tvaru na lisu nebo při kompletování plechů pro elektromagnetický obvod stroje. K tomuto skládání se obvykle využívá lisování, kde jsou plechy lisovány k sobě, aby došlo ke zvýšení plnění železa. Zanesení mechanického pnutí je možné se částečně vyhnout při laserovém řezání dynamoplechů, ale zde dochází ke vzniku tepelného pnutí. Lokálně dojde k ohřevu na velmi vysokou teplotu a vlivem dobré tepelné vodivosti železa je toto teplo odvedeno do celého objemu materiálu a řezané místo je tím prudce zchlazeno. Tato rychlá změna teplot způsobuje vznik zmíněného tepelného pnutí. Kromě laserového řezání materiálu tepelné pnutí může vzniknout také při svařování plechů představujících elektromagnetický obvod po jejich slisování k sobě. Magnetické materiálové vlastnosti se následně změni díky zanesenému vnitřnímu pnutí. 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 motory a jakýkoliv vysokootáčkový motor. 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 různě 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 jsou umístěné v 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 celý stroj.

U vysokootáčkových strojů je nutné kromě magnetických vlastností materiálu sledovat také mechanické vlastnosti. Díky vysoké obvodové rychlosti je u těchto motorů v první řadě důležitá mechanická pevnost rotoru. Mezi nejčastější problém vysokootáčkových strojů patří destrukce stroje vlivem rezonancí nebo vysokých odstředivých sil. Tyto stroje bývají obvykle menších rozměrů a požadovaný výkon je generován ve velmi malém objemu materiálu. Využití vysokých

otáček přivádí stroj na hranici možností a je nutné mít nejen správný mechanický výpočet, ale i elektromagnetický a tepelný výpočet. Tyto stroje jsou určeny pro speciální aplikace, které mohou sloužit k vědeckým účelům, a proto mohou mít i k specifické provozní požadavky. Například mohou být použity u nově konstruovaných fúzních reaktorů, jejichž specifikem je v určitých částech zařízení kombinace vakua, extrémní teploty a extrémního chladu.

1 DOSAVADNÍ VÝVOJ

1.1 Typy ztrát v elektrických strojích

V každém elektrickém stroji se vyskytují různé druhy ztrát (elektrické, elektromagnetické nebo mechanické). Ideální stroj by byl úplně bezztrátový, ale ten není realizovatelný. Všeobecnou snahou je se co nejvíce ideálu přiblížit, ať už z důvodu úspory elektrické energie, materiálu nebo kvůli plnění limitů účinnostních tříd elektrických strojů. Například v případě asynchronních strojů se jedná o normy IE1 – standardní účinnost až IE4 – velmi vysoká účinnost. V současnosti je pro nové motory v platnosti standard IE3 [5].

Ztráty v elektrických strojích [17] se obecně dělí na:

- Mechanické ztráty P_{mech} způsobené např. třením v ložiscích, třením rotujících částí o vzduch (ventilační ztráty), třením kartáčů o kroužky nebo komutátor. U běžných strojů jsou ventilační ztráty minimální a obvykle splývají s ostatními mechanickými ztrátami. Toto ovšem neplatí u vysokootáčkových strojů, kde jsou při extrémních obvodových rychlostech, vlivem vyšších otáček nebo průměru rotoru větší hodnoty ventilačních ztrát, které se podílí výraznou měrou na velikosti celkových mechanických ztrát.
- Ztráty v magnetickém obvodu stroje P_{Fe} neboli ztráty v železe. Tyto se skládají hlavně ze ztrát hysterezních P_h a ztrát od vířivých proudů P_v .
- Ztráty ve vinutí (nejčastěji ztráty v mědi) závisí na odporu vinutí a druhé mocnině protékajícího proudu.

Dodatečné ztráty P_e , obsahují všechny další druhy ztrát, které se běžně ve větší míře neprojevují a počítáme mezi ně ztráty vyššími harmonickými, vířivými proudy v hmotách blízko vinutí a ztráty komutátoru.

1.2 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. Mezi standardizovaný způsob patří měření na Epsteinově rámu, které je ale velmi málo variabilní a v určitých případech je výhodnější použití toroidního nebo otevřeného vzorku.

1.2.1 Epsteinův rám

Epsteinův rám je měřicí zařízení, jenž slouží ke standardizovanému měření magnetických vlastností dle [8]. Tento rám se skládá z měřicího přípravku definovaných rozměrů a vlastního měřeného vzorku [2]. 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. Samotné použité plechy se skládají podle směru válcování, kde dvě rovnoběžné strany ve čtverci jsou poskládané z plechů vyražených po směru válcování a další dvě kolmo ke směru válcování. Vlastní měření je založeno na indukční metodě se dvěma vinutími, kde se k napájení primárního vinutí používá buď napěťový, nebo proudový zdroj a následně se sekundární vinutí používá k měření indukovaného napětí, ze kterého lze po přepočtu z geometrie vzorku a integrování zjistit velikost magnetické indukce. 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 [4, 6, 7].

1.2.2 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. Ke konstrukci točivých elektrických strojů se také používají plechy z neorientovaného materiálu, ale každý plech vykazuje vlivem válcování, mírné odchylky magnetických vlastností vzhledem k ose válcování. Při měření na Epsteinově rámu se obvykle používají pruhy plechů nařezané z podélné a příčné osy válcování. Toto zjednodušení může mít u malých a středních elektrických strojů značný vliv na výsledné výstupní charakteristiky daných strojů. Daní za tento příhodnější 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 rovnoměrně navinout 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. 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.

Na výsledné magnetické měření má vliv velikost průřezu magnetického obvodu, kde nejvýhodnější tvar je čtvercový průřez a u toroidu i velikost poměru vnějšího a vnitřního průměru mezikružích. Tento poměr určuje velikost chyby magnetického měření, protože při hodnotě poměru větší jak 1,25 dochází k nerovnoměrnému rozložení magnetického toku ve vzorku a zkreslení měření. Ideální poměr průměrů je 1,1 dle literatury [2, 9].

1.2.3 Otevřený vzorek

Magnetická měření na otevřeném vzorku jsou výhodná z pohledu jednoduchosti testování do vyšších magnetických polí, nižší spotřeby materiálu a možnosti testování většího množství vzorků různých materiálů v krátkém čase [2]. Tento vzorek lze navíc jednoduše měřit i při namáhání v tahu a tlaku [11]. Měřicí zařízení se skládá ze jha, které je rozděleno na dvě poloviny a vzorek je vložen napříč mezi dané poloviny. Okolo vzorku jsou následně umístěny budicí a měřicí cívky. Nevýhodou tohoto typu měření je nerovnoměrná magnetizace a nutnost použití korekce (demagnetizačního faktoru). Tento faktor je nutné uplatnit v případě každého měření na otevřeném vzorku a navíc pro každý geometrický tvar má jinou hodnotu [9].

1.2.4 Vibrační magnetometr

Měření magnetických vlastností pomocí vibrací patří mezi další možnosti, jak získat vlastnosti materiálů. 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 indukovanému napětí. Postupnou změnou velikosti budícího magnetického pole je možné proměřit celou magnetizační charakteristiku daného vzorku [2]. 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 zde nevyskytují. Nevýhodou tohoto měření je ovšem použití malého vzorku, na kterém se nemusí projevit všechny vlivy viditelné z měření na větších vzorcích a nelze zde měřit velikost celkových magnetických ztrát. Princip této metody je založen na měření otevřeného vzorku, a proto je nutné uvažovat nepřesnosti pramenící z této metody.

1.3 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 [8]. 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. Nejvýraznější změny u testovaného vzorku jsou patrné v případě výraznější blízkosti řezných hran. Při větší vzdálenosti řezných hran se velikost pnutí v celkovém objemu materiálu snižuje, vlivy opracování slábnou a magnetické vlastnosti se opět zlepšují.

Mezi nejčastější způsob výroby žádaného tvaru plechu pro elektrický stroj se používá ražení lisem. Jedná se o nejlevnější a nejjednodušší metodu sériové výroby statorových a rotorových plechů. Jejich podstatnou nevýhodou je tvorba otřepů a deformace materiálových zrn. Další možností je výroba požadovaného tvaru pomocí laseru, ale tato možnost se spíše využívá u kusové výroby, kde se nevyplatí vyrábět novou razicí formu. Laserové řezání způsobuje rychlé lokální přehřátí a zchlazení materiálu [10]. Zanesené tepelné pnutí pak zhoršuje celkovou relativní permeabilitu a celkové magnetické ztráty při nižších hodnotách magnetické indukce [11]. Jakmile dojde k nasycení magnetického obvodu u plechu řezaného laserem, tak hodnota relativní permeability zůstává téměř stejná jako po mechanickém ražení lisem. Velikost pnutí, které vznikne po ražení na lisu je obecně mnohonásobně menší než při pálení laserem [10, 12–14]. Samotné řezání laserem lze realizovat např. tavnou nebo oxidační metodou. Každá metoda má své výhody, nevýhody [15] a používá se na jiný typ řezání [16]. 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 [12].

Údaje od výrobců jsou obvykle získány z měření vzorků vyrobených stříhem a měřených na Epsteinově rámu. Plechy určené na statorová a rotorová jádra jsou vždy opracovány do určitého tvaru a následně staženy do požadovaného svazku. Zhoršení magnetických vlastností vlivem výroby lze očekávat nejvíce u malých a středních elektrických strojů. Vlivu výroby se lze zbavit žíháním, po kterém dochází k uvolnění zaneseného pnutí a zrna materiálu se stávají opět větší. Uvolněním zaneseného pnutí a dojde k opětovnému zlepšení magnetických vlastností a tím celkové účinnosti elektrického stroje [12, 13].

1.4 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 [11], který snižuje elektrickou vodivost. Na druhou stranu větší množství křemíku zhoršuje celkovou obrobitelnost výrobku. Dále je možné pro snížení velikosti vířivých ztrát vhodně geometricky upravit příslušnou součástku tak, aby vířivé proudy byly nuceny procházet skrz co nejdelší dráhu, která má větší odpor, čímž dojde k jejich omezení. 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 [2, 9, 17].

1.5 Vlastnosti magneticky tvrdých materiálů

Magneticky měkké materiály lze zmagnetovat a demagnetovat velmi lehce, zatímco magneticky tvrdé materiály představují obtížnější úkol. U těchto materiálů se vyskytuje velmi silná anizotropie. Kromě velikosti magnetické indukce a koercitivní síly je pro použití v elektrickém stroji důležité znát i náchylnost daného druhu magnetu na demagnetizaci a jeho 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 velká elektrická vodivost, velká citlivost na teplo (neodymové magnety) a nízká hodnota Curieho teploty, při které ztrácí každý materiál své magnetické vlastnosti. 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, které se zde nevyskytují v takové míře. U tohoto typu magnetů je nutné vhodně nastavit pracovní bod, aby nedošlo vlivem reakce kotvy k jeho demagnetizaci [17].

Vzhledem k vysoké citlivosti magnetů na teplotu a následné změně jejich magnetických vlastností je nutné provést obezřetně celý elektromagnetický i tepelný návrh elektrického stroje [18–20]. Magnety představují plný materiál, který je náchylnější ke vzniku ztrát vířivými proudy. Jejich velikost 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 [21–23].

Ověření navrženého elektrického stroje se velmi často provádí simulací pomocí metody konečných prvků, kde z důvodu ušetření výpočetního času se provádí simulace např. pouze jednoho kusu segmentovaného magnetu. Výsledný výpočet ztrát na celý pól se provádí superpozicí spočítaných ztrát ze všech segmentů vypočtených v jednom magnetu. Zde ovšem může dojít k zanesení chyby, protože ztráty ve všech magnetech nemusí být vždy stejné. V některých částech stroje může dojít vlivem sčítání různých zdrojů vyšších harmonických ztrát k většímu zvýšení teploty než v jiné části stroje a některé magnety mohou být díky tomu zahřáty na příliš vysokou teplotu a demagnetovány [28, 30].

2 CÍLE DIZERTACE

Cílem dizertace je analýza ztrát v elektrických strojích při nestandardních podmínkách. V úvodu byl definován pojem těchto nestandardních podmínek a záměrem je provést simulace a měření ztrát na vybraných materiálech, které slouží ke konstrukci elektrických strojů. Cílem je na základě změřených parametrů materiálů vhodně provést simulaci vybraného motoru se zhoršenými parametry a provést srovnání s motorem vyrobeným pomocí zkoumaných technik.

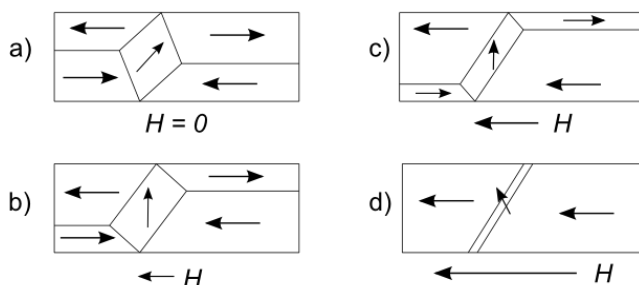
Cíle práce lze rozdělit do několika bodů

1. Volba vhodného tvaru testovaného vzorku pro magnetická měření. Průmyslově testované vzorky se dle normy testují na Epsteinově rámu, který ovšem už z vlastní podstaty neumožňuje ideální průběh magnetického toku v materiálu. Díky standardizovaným rozměrům není možné bez větší úpravy měřicího přípravku měřit jiné rozměry vzorků, než pro které je přípravek nachystán. Toroidní vzorky mají ideální tvar pro šíření magnetického toku, ale o to je větší důraz kladen na volbu vhodných rozměrů testovaného vzorku. Zvolením špatné velikosti nebo nevhodných geometrických rozměrů vede obvykle ke zkreslení měření.
2. Vliv různých druhů výroby na vlastnosti dynamoplechů, které se používají ke konstrukci elektrických strojů. Po obrobení dochází ke zhoršení jejich magnetických vlastností. Čím jsou obráběné hrany k sobě blíže, tak je zhoršení parametrů výraznější. Z tohoto pohledu je i nutné volit adekvátní velikost testovaného vzorku, aby se vzdálenost hran co nejvíce blížila k reálným částem elektrického stroje. Následná simulace pomocí metody konečných prvků (MKP) je poté mnohem přesnější, když jsou použita data z měření při dané výrobě.
3. Analýza magnetických vlastností u vzorků vyrobených z plného materiálu. Díky vyšším nárokům na pevnost se často u vysokootáčkových motorů vyskytují plné rotory. Většinou nejsou známy magnetické parametry zvažovaného plného materiálu a volba velikosti vzorku tyto parametry velmi ovlivňuje. Tyto vzorky není možné měřit na Epsteinově rámu, a proto se používá měření na toroidních vzorcích. Otázkou je volba vhodné velikosti testovaného vzorku pro plné materiály.
4. Aplikace zjištěných magnetických vlastností měkkých i tvrdých magnetických materiálů pro použití v reluktančním motoru s vnořenými magnety. Jak se projeví použití různých změřených magnetických vlastností v magnetických simulacích reluktančního motoru? Důležitou roli zde hrají i použité magnety, u kterých se mění testované parametry s teplotou. Volbou správného typu magnetu lze v něm omezit nebo naopak umožnit tvorbu vířivých proudů.

3 TEORETICKÝ ROZBOR

3.1 Magnetické materiály

Rozlišujeme dva typy magnetických materiálů magneticky měkké materiály (diamagnetika, paramagnetika a feromagnetika) a magneticky tvrdé materiály (permanentní magnety). Magnetické materiály obsahují tzv. magnetické domény (neboli Weissovy domény). V počátečním stavu tyto domény obsahují magnetické pole, které je v prostoru náhodně orientované. Přiložíme-li silné magnetické pole, tak začne docházet k jejich natáčení do směru H magnetického pole. Pokud externí pole silné, tak dochází k jejich zvětšování, spojování a natáčení do směru externího pole H viz Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Pohyb magnetických domén v externím poli a) $H = 0$ A/m až d) $H \gg 0$ A/m [17]

Pokud je vnější magnetické pole odstraněno, tak domény u magneticky tvrdých materiálů zůstávají orientované ve stejném směru, což se nazývá remanentní magnetická indukce. Jedná-li se o magneticky měkký materiál, tak se zorientované magnetické domény navrátí do původního stavu před zmagnetováním. U tohoto materiálu jsou domény náchylné ke změně směru i působením menšího magnetického pole [32].

Existuje několik druhů magnetických materiálů, které se odlišují schopností vést magnetický tok a dalšími parametry. Mezi magneticky nevodivé materiály patří diamagnetika, která magnetické pole zeslabují (např. měď, stříbro, zinek, voda). Permeabilita těchto materiálů je mírně nižší než 1. Podobné vlastnosti mají také paramagnetické materiály, které mají permeabilitu mírně větší než 1 a magnetické pole již neodpužují, ale stále nevedou, takže je není možné zmagnetovat (např. hliník, cín, chrom, olovo). Ideální pro zmagnetování jsou feromagnetické materiály, které se vyznačují relativní permeabilitou mnohem větší než 1 a používají se v elektrických strojích. Každý z těchto feromagnetických materiálů je limitován teplotou, při které je schopen vést magnetický tok. Tato teplota se nazývá Curieho teplotou. Přesáhne-li materiál tuto teplotu, dochází k jeho demagnetizaci a materiál nad touto teplotou se chová paramagneticky. Pro železo se tato teplota pohybuje přibližně okolo 770 °C, ale je specifická dle složení každého materiálu. Mezi další charakteristické vlastnosti feromagnetického materiálu patří vysoká hodnota relativní permeability μ_r , která závisí na velikosti intenzity magnetického pole v materiálu. Výsledná závislost je nelineární. Ověřit tento jev je možné na jednoduchém magnetickém obvodu s cívkou, která budí magnetický tok. Zpočátku se vzrůstajícím proudem cívky roste lineárně i magnetický tok, ale jakmile začne docházet k nasycování magnetického obvodu, tak ke stejnému nárůstu toku jako v předchozím případě je nutný mnohem větší proud [32].

3.1.1 Magneticky měkké materiály (feromagnetika)

Typickým příkladem magneticky měkkého materiálu s využitím v konstrukci elektrických strojů jsou plechy pro elektrotechniku neboli dynamoplechy. Mezi sledované parametry u těchto plechů patří velikost celkových magnetických ztrát, magnetické indukce, permeability, tvaru křivky počáteční magnetizace a elektrické vodivosti. Ztráty v železe a permeabilitu u plechů pro elektrotechniku, lze ovlivnit chemickým složením, krystalografickou texturou, velikostí zrn, vnitřním i vnějším pnutím a čistotou materiálu. Mezi nejsnáze řízené parametry patří chemické složení a čistota materiálu. Mezi nejobtížnější zase patří získání požadované textury, protože ta se neustále mění během jednotlivých fází výroby vlivem termomechanických procesních kroků. Ovšem snížením magnetických ztrát nedosáhneme automatického zlepšení a zvýšení permeability. Tyto vlastnosti jsou na sobě nezávislé a většinou je nutné udělat několik úprav, aby bylo dosaženo snížení ztrát a současně i zvýšení permeability. Jeden z nejzásadnějších sledovaných parametrů je velikost zrn materiálu. Chemické složení a postup výroby plechů zásadně ovlivňuje magnetické vlastnosti materiálu. Válcovaný materiál předepsaného složení je žíhán, aby bylo odstraněno pnutí a sjednocena velikost materiálových zrn. Průměrná velikost zrn bývá přibližně okolo 33 – 150 μm , ale pro každý materiál se liší [34]. Změna velikosti zrna v rámci 40 μm se při nízké frekvenci neprojevuje žádnou výraznější změnou permeability nebo ztrát a je tudíž zanedbatelná. Na vyšší frekvenci se začínají projevovat odchylky, které při nižší frekvenci jsou nepodstatné, a proto i menší změna může mít blahodárný efekt na výsledné parametry [36].

Celkové magnetické ztráty lze rozdělit na hysterezní, vířivé a přídavné ztráty. Hysterezní ztráty způsobuje nevratný pohyb doménových stěn s následným slučováním nebo zánikem opačně orientovaných domén. Magnetická doména může být obsažena buď jednotlivě v daném zrně materiálu, nebo se může rozpínat přes několik zrn, nebo je také možné, aby bylo více domén v jednom zrně materiálu. Hysterezní ztráty jsou tedy závislé na velikosti zrn a textuře materiálu. Velká zrna v materiálu obsahují větší domény, které produkují menší hysterezní, ale zase větší vířivé ztráty. Menší zrna způsobují větší překážku v pohybu doménových stěn, ale zase na vyšších frekvencích vykazují nižší ztráty vířivými proudy [34, 36]. Pro názornou představu lze ztráty vířivými proudy zjednodušit a představit si je jako systém elektrického obvodu, kde zrna a hranice zrn mohou být nahrazeny odpory. Vířivé proudy mohou procházet skrz zrna nebo jejich hranice. Dále se mohou uzavírat v jednotlivém zrně nebo mezi několika doménami v jednom zrně [38]. Přídavné ztráty jsou proti tomu závislé na tloušťce, průřezu, vodivosti a mikrostruktuře materiálu. Ztráty vířivými proudy se vyskytují hlavně ve spojitosti s elektrickou vodivostí a tloušťkou materiálu. Nárůst jednotlivých ztrát ovšem není lineární a zvětšení jednoho druhu ztrát neznamená, že dojde k podobnému zvýšení i u ostatních ztrát. Například přídavné ztráty se zvětšují s rostoucí velikostí zrn v materiálu, ale hysterezní ztráty se tím snižují. Popis hysterezních ztrát navíc komplikuje fakt, že na větších frekvencích dochází vždy k pohybu všech domén současně, zatímco na nízké frekvenci dochází vždy k částečnému pohybu určitých doménových stěn [34].

Přidáním různých příměsí lze ovlivnit vlastnosti materiálu. Nejčastější příměsí u plechů pro elektrotechniku je křemík, který zvyšuje rezistivitu materiálu a potlačuje ztráty vířivými proudy. Nevýhodou této příměsí je, že zvyšuje křehkost a tvrdost daného plechu. Příliš vysoké množství křemíku zhoršuje vlastnosti v rámci textury materiálu, a proto je výhodnější používat menší množství příměsí, které je dostatečné na snížení elektrické vodivosti materiálu [34].

Kromě výše zmíněných důvodů se na velikosti ztrát podílí také větší množství karbidů železa Fe_3C , které se odstraňuje dekarbonizací. Velikost ztrát také ovlivňuje větší množství výrazných sraženin v materiálu. Sraženiny mohou zvýšit vnitřní pnutí vlivem zkroucení mřížkové struktury,

což způsobí během magnetizace sníženou možnost pohybu doménových stěn. Sraženiny snižují výslednou permeabilitu i velikost magnetických ztrát. Dále znesnadňují růst zrn materiálu, což také následně ovlivní výsledné vlastnosti. Největší pinnig efekt na růst zrna a pohyb doménových stěn během magnetizace mají sraženiny, jejichž velikost je přibližně stejná jako tloušťka doménových stěn (30-100 nm). Pokud je na mm² o 100 více sraženin, než je předpokládáno, tak jsou ztráty v železe vyšší o 0,2W/kg [38].

Celkově jsou magnetické vlastnosti neorientovaných ocelí ovlivněny nejčastěji chemickým složením a texturou materiálu. Zlepšit magnetické vlastnosti materiálu lze dodatečným žíháním s následnou rekrytalizací [15]. Ovšem úspěšnost tohoto postupu závisí na teplotě žíhání a počátečním stavu materiálu (množství deformací). Ideální teplota na žíhání neorientovaného ocelového plechu pro elektrotechniku je 725°C podle článku [42]. Žíhání na vyšších teplotách způsobuje fázovou přeměnu a s následnou změnou textury, která už magnetické vlastnosti dále nezlepší, ale může je zhoršit. Sekundární fáze v materiálu, které vznikají při žíhání na příliš vysoké teplotě, mají vliv na pinning doménových stěn, které se následně hůře pohybují a je potřeba více energie k překonání uchycení, což vede k větší hodnotě ztrát [42].

3.1.2 Magneticky tvrdé materiály

Magneticky tvrdé materiály mají přesně opačné vlastnosti jak magneticky měkké materiály. Nelze je snadno magnetovat a po odstranění vnějšího magnetického pole většina domén zůstává natočená stále ve stejném směru dříve působícího externího pole. U magneticky tvrdého materiálu je nutné zabránit pohybu magnetických domén, aby nedošlo k navrácení natočení domén do náhodné orientace, jak bylo před zmagnetováním. Posuvu doménových stěn lze zabránit nečistotami v materiálu a velmi jemnou strukturou v materiálu, díky které bude v každém zrně pouze jedna magnetická doména. Takto získaná anizotropie krystalů materiálu a anizotropie tvaru krystalů zabráňují natáčení magnetických domén, což vede ke zvýšení magnetické tvrdosti a koercivity. U magnetů ze vzácných zemin je tato anizotropie založena na anizotropním materiálu magnetů. Ferity tuto anizotropii získávají při stlačování lisem v magnetickém poli [17].

Z různých druhů materiálů pro výrobu magnetů se používají slitiny AlNiCo, feritové magnety, SmCo a neodymové magnety. Feritové magnety mají obvykle remanentní magnetismus 0,4T, nízkou elektrickou vodivost a vysokou Curieho teplotu. Ferity lze obvykle snáze demagnetizovat, když jsou studené. Při vzrůstající teplotě roste jejich rezistivita a jsou odolnější proti demagnetizaci. Magnety ze vzácných zemin SmCo mají obvykle remanentní indukci 1,0T a neodymové magnety (Neodym, železo, bór) mají indukci obvykle 1,5T. Nevýhodou je zase vysoká elektrická vodivost. Neodymové magnety je možné vylepšit kobaltem, který zvyšuje jejich odolnost proti korozi a Curieho teplotu. Nevýhodou kobaltu je, že je podstatně dražší jak zbytek magnetu. Provozní teplota může být po přidání příměsí až 180°C. Se vzrůstající teplotou výrazně klesá vnitřní koercitivní síla magnetů, protože jsou velmi citlivé na teplo. SmCo mají lepší odolnost proti korozi než neodymové magnety. Používají se v aplikacích, kde hlavním kritériem je tepelná odolnost magnetu a nízká hmotnost. Provozní teplota může být až 250°C. Jejich nevýhodou je vysoká křehkost. Magnetické materiály ze vzácných zemin nejsou na rozdíl materiálů feritových a materiálů typu ALNICO náchylné k demagnetizaci. Dále může být magnet demagnetizován magnetickým polem vlivem reakce kotvy. [17].

3.2 Princip magnetických měření

Obecně se magnetismem a elektromagnetismem zabývají Maxwellovy rovnice. Z těchto rovnic vyplývá, že součet součinu magnetické indukce s dílčími ploškami, které vytváří navinutý vodič je

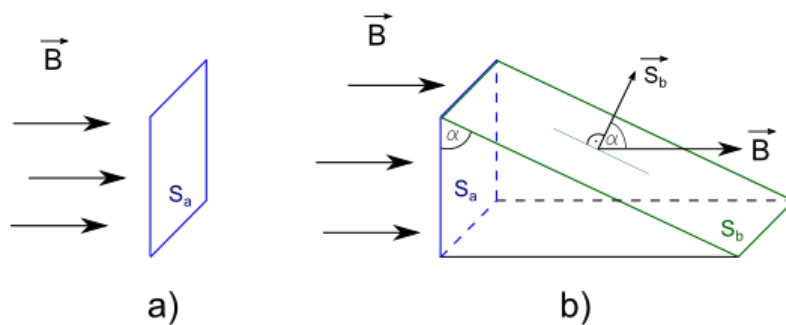
$$\psi = \sum_{k=1}^N \vec{B}_k \cdot \vec{\Delta S}_k . \quad (1)$$

Sprážený tok cívky ψ lze vypočítat skrze sumu dílčích plošek ΔS , kterými prochází magnetická indukce B . Při výrazném zjemnění plošek pak dochází k transformaci vztahu (1) na vztah

$$\psi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} . \quad (2)$$

Tento plošný integrál je počítán přes celou plochu S . Integrál musí obsahovat skalární součin, protože sprážený tok je skalární veličina a plocha S by měla být orientovaná. V tomto výpočtu vůbec nefiguruje počet závitů cívky N , protože už jsou obsaženy v jednotlivých dílčích ploškách, které jsou následně sečteny. Plocha, přes níž je integrál počítán může být libovolně deformovaná za předpokladu zachování konstantního tvaru hraniční křivky l . Velikost plošného integrálu spráženého toku je poté nezávislá na tvaru plochy S . Na základě vztahu (2) lze říci, že velikost plošného integrálu přes plochu S nezávisí na jejím tvaru, ale je nutné, aby byl zachován konstantní tvar hraniční křivky l [24] viz Obr. 3.2 jenž je založen na vztahu

$$\psi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = BS_b \cos \alpha = B \frac{S_a}{\cos \alpha} \cos \alpha = BS_a . \quad (3)$$



Obr. 3.2 Souhrnná plocha cívky tvaru a) obdélníku b) dutého klínu [25]

Pro výpočty spráženého toku ve feromagnetiku lze použít obdobný vztah, který je založen na součtu rozptylového toku skrz vzduchovou cestu a toku uvnitř feromagnetika. Ale v případě těsného navinutí vodiče kolem vzorku se rozptylový tok zanedbává [24]

$$\psi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_{S_{vz}} \vec{B}_{vz} \cdot d\vec{S}_{vz} + \sum_{k=1}^N \int_{S_{Fe,k}} \vec{B}_{Fe} \cdot d\vec{S}_{Fe,k} . \quad (4)$$

Vztah pro výpočet spráženého toku při zanedbání rozptylového toku vypadá následovně [24]:

$$\psi \equiv \sum_{k=1}^N \int_{S_{Fe,k}} \vec{B}_{Fe} \cdot d\vec{S}_{Fe,k} \cdot \cos \alpha_k \Rightarrow \sum_{k=1}^N B_{Fe} \frac{S_{Fe}}{\cos \alpha_k} \cos \alpha_k = \sum_{k=1}^N B_{Fe} S_{Fe} = N B_{Fe} S_{Fe} = N \phi \quad (5)$$

Měření magnetických vlastností indukční metodou je založeno na principu Faradayova zákona, kde uvažujeme generátorický režim cívky

$$u(t) = - \frac{d\psi(t)}{dt} . \quad (6)$$

Vzhledem k tomu, že svorkové napětí cívky je rovnoměrně rozprostřeno po celé délce vodiče pak lze hodnotu celkového napětí získat křivkovým integrálem skalárního součinu [24]

$$u(t) = \int_l \vec{E}(t) \cdot d\vec{l} \quad (7)$$

Kombinací vztahů (6) a (7) dostaneme druhou Maxwellovu rovnici v integrálním tvaru [24]

$$\int_l \vec{E}(t) \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B}(t) \cdot d\vec{S} \quad (8)$$

Kromě druhé Maxwellovy rovnice se při magnetických měřeních indukční metodou používá také první Maxwellova rovnice, kterou lze odvodit ze vztahu pro výpočet proudové hustoty a Ampérova zákona. Při jejím odvození uvažujeme speciální složkový tvar proudu a napětí uvedený pro složku v ose z. Pro rovnoměrné i nerovnoměrné rozložení proudové hustoty v rámci uzavřené plochy S (ohrazené křivkou l) platí vztah [24]

$$i = \int_S \vec{J}_I \cdot d\vec{S} , \quad (9)$$

který lze upravit

$$i = \int_S \vec{J}_I \cdot d\vec{S} = \sum_k \int_{S_k} \vec{J}_{I,k} \cdot d\vec{S}_k = \sum_k i_k . \quad (10)$$

V případě, že se jedná o jeden stejný vodič několikrát protínající stejnou plochu, tak lze vztah (10) zjednodušit na

$$i = \int_S \vec{J}_I \cdot d\vec{S} = N \cdot i_c , \quad (11)$$

kde i_c je přitom proud protékající vodičem. Celkový proud i , který protéká plochou S (ohrazenou křivkou l) je magnetické napětí u_m a jeho vztah je definován [24]

$$u_m \equiv i = \int_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_k i_k \quad (12)$$

V předchozích případech hraniční křivka, přes kterou se počítal integrál, obklopující uvažovanou plochu S nesměla být deformována. V tomto případě na základě vztahu (10) velikost

magnetického napětí není závislá na tvaru integrační křivky l a může být deformována za předpokladu, že všechny proudy stále leží uvnitř integrované plochy S [24].

První Maxwellova rovnice má následně po spojení vztahů proudové hustoty s ampérovým zákonem vztah [24]

$$\int_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J}_I \cdot d\vec{S}. \quad (13)$$

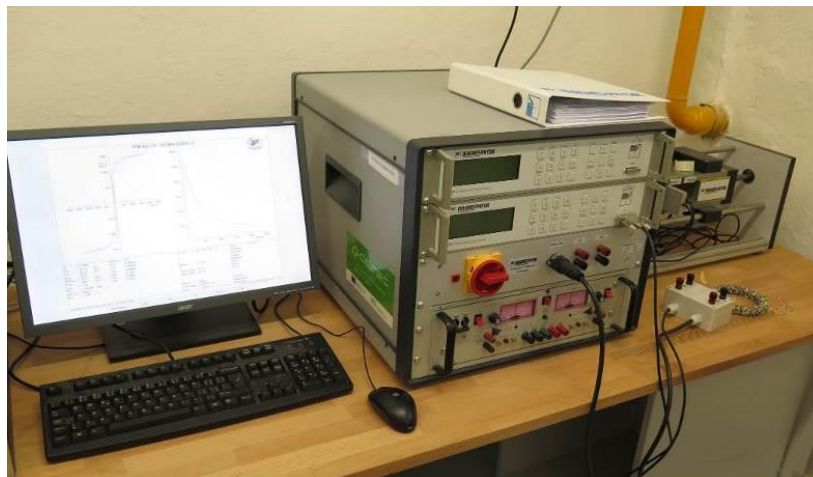
3.3 Měření magneticky měkkých materiálů

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 [2].

Indukční metody, které jsou založené na měření magnetického toku pomocí cívky, využívají principu Faradayova zákona dle vztahu (6). Velikost magnetického toku je následně odvozena od velikosti vektoru magnetické indukce, který ovlivňuje právě indukované napětí u_i . Pro výpočet intenzity magnetického pole H z magnetizačního proudu lze využívat vztah

$$H = \frac{N_1 \cdot I_1}{l_{Fe}}, \quad (14)$$

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.



Obr. 3.3 Měřicí stanoviště pro měření magnetických vlastností (RemaGRAPH – RemaCOMP C710)

Výpočet magnetických ztrát P_s je dán vztahem

$$P_s = \frac{1}{m_a} \frac{N_1}{N_2} \frac{1}{T} \int_0^T u_2(t) i_H(t) dt, \quad (15)$$

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 [2]. 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.

3.3.1 Statická hysterezní křivka

Kvazistatická hysterezní křivka je měřená při dostatečně nízkém kmitočtu, aby bylo možné vyloučit vliv skin efektu a vířivých ztrát. Křivka není rozšířena ve směru vodorovné osy H , nevyskytují se zde žádné vířivé proudy. Při kvazistatickém měření dochází primárně k měření magnetické polarizace $J(H)$, která je součástí měřené magnetické indukce a popisuje chování materiálu na atomární úrovni. Kromě magnetické polarizace vlastních atomů se v meziatomárním prostoru feromagnetika vyskytuje i magnetizace vakua $\mu_0 H$, která není závislá na typu materiálu. Výsledná indukce ve feromagnetiku se tedy skládá ze zmíněných dvou složek dle vztahu [24]

$$B(H) = \mu_0 H + J(H) \quad (16)$$

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 $B(H) = J(H)$.

Před každým kvazistatickým měřením je nutné demagnetovat testovaný vzorek, což lze provést buď zahřátím nad Curieovu teplotu, nebo pozvolným snižováním střídavého proudu do nulové hodnoty. Maximální velikost demagnetizační frekvence je 1 Hz, ale je možné nastavit i nižší hodnotu. Obdobně lze nastavit i velikost prvotní amplitudy a délku trvání celé demagnetizace. Vlastní demagnetizace by se neměla provádět příliš dlouho z důvodu nárůstu chyby driftu u použitého integrátoru ve fluxmetru. Drift [43] je přitom nežádoucí změna v hodnotách zobrazovaných zařízení, které nevznikly změnou měřeného toku. Je také obvykle způsoben integrací všech parazitních napětí a různého šumu, který se objeví při počátku integrace.

Kvazistatická hysterezní křivka se nejčastěji měří řízenou rychlostí, takže je dosaženo konstantní změny magnetické indukce v čase dB/dt . Toto nastavení dovoluje měřit strmé části hysterezní křivky dostatečně pomalu, aby byly vířivé proudy zanedbatelné. Ploché části křivky (po nasycení materiálu) se následně měří ve větší rychlosti, protože zde již hysterezní křivka není ovlivněna vířivými proudy. V případech kdy je hysterezní křivka příliš strmá, je možné místo řízené rychlosti provádět měření konstantní rychlostí [25].

3.3.2 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 oscilografickou metodou 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 [25]. Vztahy pro výpočet magnetické indukce jsou

$$u_i(t) = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \cdot S_{Fe} \frac{dB}{dt}, \quad (17)$$

a

$$B(t) = \frac{1}{N_2 \cdot S_{Fe}} \int u_i(t) dt. \quad (18)$$

Indukované napětí u_i je vzorkováno A/D převodníkem a je úměrné počtu sekundárních závitů N_2 , průřezu magnetického obvodu a také napájecí frekvenci [25].

Počet závitů N_2 musí být zvolen tak, aby výsledné indukované napětí nepřetížilo A/D převodník ($U_{i,ef} = 30$ V nebo $U_{i,max} = 42$ V). Indukované napětí musí být také dostatečně velké, aby nebylo zkreslováno šumem při vlastním měření hysterezní křivky. Ideální by bylo, aby indukované napětí dosahovalo hodnoty 10 V ve špičkové hodnotě. Bohužel přesný výpočet tohoto napětí není předem možný, protože ho ovlivňuje tvar hysterezní křivky. Pro hrubý odhad počtu sekundárních závitů lze použít vztah [25]

$$N_2 \approx \frac{U}{2\pi f \cdot S_{Fe} \cdot B_{max}} \cdot \frac{H_c}{H_{max}}, \quad (19)$$

kde napětí U je maximální napětí převodníku, H_c je koercivita, B_{max} maximální magnetická indukce a H_{max} maximální intenzita magnetického pole testovaného materiálu. S_{Fe} je velikost průřezu testovaného vzorku a f testovací frekvence.

Měření na přístroji RemaCOMP umožňuje v programu vybrat nastavení „přímé spojení“, což vede k přímému připojení generátoru na vstup zesilovače. Toto nastavení umožňuje vyšší buzení primárního vinutí a následně i lze dosáhnout vyšších hodnot intenzity magnetického pole. Nevýhodou je, že při měření malých polí dochází k nechtěné stejnosměrné magnetizaci vzorku a zanášení stejnosměrného napěťového offsetu. Toho problému se je možné zbavit nastavením korekční hodnoty napětí a snížením velikosti celkového výsledného offsetu. Nebo je možné použít induktivní vazbu, která významně eliminuje problém napěťových DC offsetů. Generátor v tomto nastavení je galvanicky oddělen od výkonového zesilovače, takže nedochází k přenosu stejnosměrné složky napětí [25].

Dalším úskalím při měření s přístrojem RemaCOMP je, že při měření na nízkých frekvencích měřicí přístroj nastaví maximální proud bez omezení. Využívá zde ke snímání proudu odpor s nízkou indukčností, který zajišťuje minimální rušení v zaznamenaných hodnotách. Měření na vyšších frekvencích je zase problematické z pohledu maximálního napětí operačního zesilovače U_{max} , maximálního výstupního proudu I_{max} , vnitřního odporu R_i , odporu primárního vinutí R_{N1} včetně bočníku R_s a indukčnosti primárního vinutí L . Pro vyšší frekvence platí vztah [25]

$$I_{max} = \frac{U_{max}}{\sqrt{(R_s + R_i + R_{N1})^2 + (\omega L)^2}}. \quad (20)$$

Indukčnost primárního vinutí L totiž vede k omezení maximálního proudu a díky tomu i intenzitě magnetického pole. Při měření na vyšších frekvencích je vyžadováno snížení počtu primárních závitů, protože pokud nedojde ke snížení počtu závitů, tak dochází při rostoucí frekvenci úměrně ke zvyšování amplitudy napájení [25].

3.4 Měření magneticky tvrdých materiálů

Vlastnosti permanentních magnetů lze získat pomocí hysteresisgrafu nebo vibračního magnetometru. Nejčastěji se používá hysteresisgraf, který je připojen k měřicímu jhu s elektromagnety a měření provádí obdobně jako u magneticky měkkých materiálů (kvazistaticky). Testovaný vzorek je obklopen měřicími cívkami a vložen mezi pólové nástavce s elektromagnety, které přiléhají celou plochou k testovanému vzorku. Přítlačná síla pólových nástavců musí být dostatečně velká, aby nevznikla vzduchová mezera mezi testovaným vzorkem a pólovým nástavcem, ale také nesmí být příliš velká, aby nedošlo k rozdrčení testovaného 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 [26, 27].

Tabulka 3.1 Technické parametry přípravku s integrovanými cívkami k měření magnetických vlastností magnetů [27]

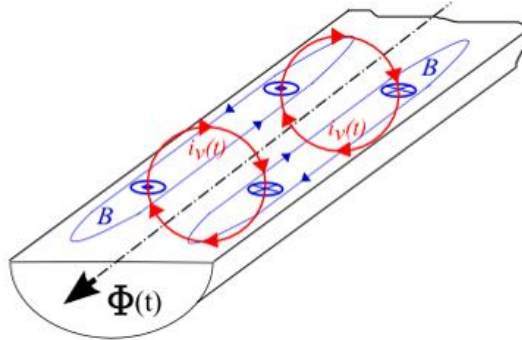
Typ	JH 10-1	JH 26-1	JH 60-1	JHT 10-2	JHT 10x4
Průměr	10 mm	26 mm	60 mm	10 mm	10 mm
Průměr vzorku	10...5(2)mm	26...15mm	60...40mm	10...5(2)mm	10...5(2)mm
Tloušťka cívky	1 mm	1 mm	1 mm	2 mm	4 mm
Maximální (krátkodobá) provozní teplota	40 °C	40 °C	40 °C	200 °C	200 °C

Při měření je nutné kontrolovat a měřit teplotu okolí, včetně vlastního magnetu. Měření lze provádět při pokojové teplotě nebo při zvýšené teplotě, což představuje podmínky při provozu elektrického stroje. Každý měřený vzorek by měl být před měřením řádně namagnetován, aby změřené hodnoty opravdu odpovídaly vlastnostem testovaného materiálu. Dále je také nutné před každým měřením provést korekci driftu u používaných fluxmetrů a resetovat je na nulovou hodnotu. Testované vzorky by měly mít vždy minimální rozměry vzhledem k použitému přípravku s měřicími cívkami, který je k dispozici pouze v několika velikostech. 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 [26, 27].

3.5 Magnetický skinefekt

Pojem skinefekt se používá obvykle ve spojení s elektrickými vodiči. Jeho podstata spočívá ve vytlačování proudu ze středu vodiče k jeho povrchu při vyšších frekvencích proudu. Následně dochází ke zvětšení proudové hustoty v povrchové vrstvě vodiče, což vede k přehřívání vodiče, které může mít za následek až poškození povrchové izolace a zkratování vinutí. Kromě

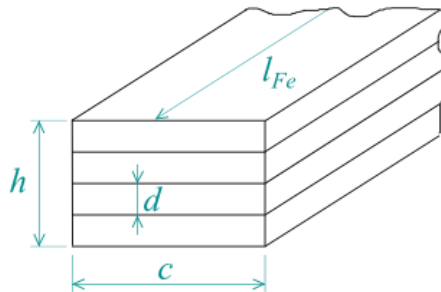
elektrického skin efektu se vyskytuje také skin efekt magnetický, který je založen na podobném principu viz Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Schématický náčrt magnetického skin efektu ve vodiči [24]

Zde při vyšších frekvencích dochází k vytlačování magnetického toku od středu k povrchu magnetického vodiče (plechu nebo plného materiálu). Zvýšená hustota magnetického toku v podpovrchové vrstvě vede ke zvýšení hodnoty magnetické indukce, lokálnímu přesycování, vzniku vířivých proudů a tím pádem k nárůstu hysterezních a vířivých ztrát [24].

Při výpočtech skin efektu a vířivých ztrát s vířivým odporem uvažujeme svazek plechů Obr. 3.5, kde h je výška svazku plechů, d je tloušťka jednoho plechu, c je šířka plechů magnetického obvodu, l_{Fe} je délka střední siločáry (délka svazku) a n je počet použitých plechů.



Obr. 3.5 Řez svazkem plechů [24]

Důležitým vztahem při zohledňování skin efektu je výpočet hloubky vniku, kterou lze vypočítat vztahem [24]

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}, \quad (21)$$

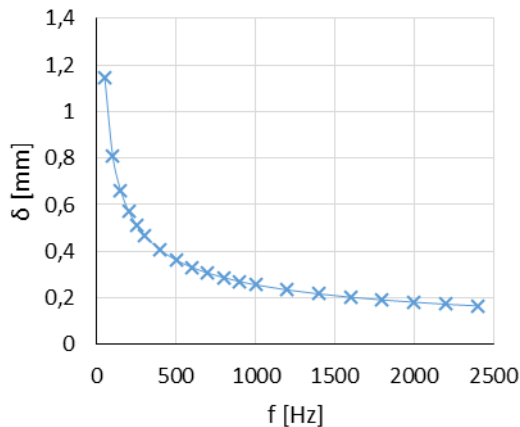
kde ρ je rezistivita a μ permeabilita materiálu. Hloubka vniku δ se zmenšuje s rostoucí frekvencí. Mezní stav nastává při mezním kmitočtu, když se hloubka vniku zmenší na polovinu tloušťky plechu $\delta = d/2$. [24]

$$\omega_{mez} = \frac{8\rho}{\mu d^2} \Rightarrow f_{mez} = \frac{4\rho}{\pi\mu_0\mu_{rFe}d^2}. \quad (22)$$

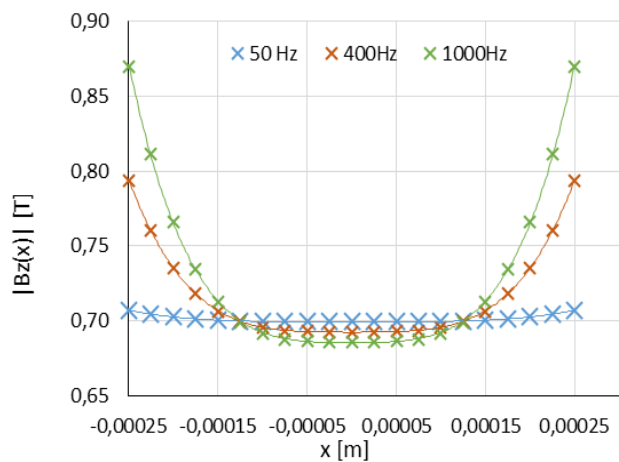
Velikost magnetické indukce v tenkém ocelovém plechu lze vypočítat pomocí vztahu odvozeném v literatuře [24]

$$|B_z(x)| = \frac{\mu\omega Bd\delta}{2\sqrt{2}\rho} \frac{\sqrt{\cosh \frac{2x}{\delta} + \cos \frac{2x}{\delta}}}{\sqrt{\cosh \frac{2q}{\delta} - \cos \frac{2q}{\delta}}} = B \frac{d}{\sqrt{2}\delta} \frac{\sqrt{\cosh \frac{2x}{\delta} + \cos \frac{2x}{\delta}}}{\sqrt{\cosh \frac{2q}{\delta} - \cos \frac{2q}{\delta}}} . \quad (23)$$

Orientačním dosazením parametrů $\mu_r = 1500$ a rezistivity $\rho = 39\mu\Omega\text{cm}$ do vztahu (21) lze získat hloubku vniku zobrazenou na Obr. 3.6. Tímto výpočtem je možné zjistit, jak nerovnoměrně bude rozložená magnetická indukce v magnetickém obvodu na vyšší frekvenci např. u vysokootáčkových strojů nebo v rotoru vlivem vyšších harmonických způsobených drážkováním statoru. Je důležité mít na paměti, že vypočtená grafická závislost se mění dle změny permeability při různém sycení a frekvencích. Výsledná změna magnetické indukce po dosazení do vztahu (23) je zobrazena na Obr. 3.7. Výpočet byl proveden pro materiál M470-50A, který má rezistivitu $\rho = 39\mu\Omega\text{cm}$. Pro zvolenou magnetickou indukci $B = 0,7 \text{ T}$ a relativní permeabilitu $\mu_{r,50\text{Hz}} = 5800$, $\mu_{r,400\text{Hz}} = 2700$, $\mu_{r,1000\text{Hz}} = 1500$.



Obr. 3.6 Hloubka vniku v závislosti na vzrůstající frekvenci



Obr. 3.7 Rozložení magnetické indukce pro střední pracovní amplitudu 0,7T při různých frekvencích

3.6 Ekvivalentní vířivý odpor jádra

Popis základních geometrických rozměrů svazku plechů, které lze použít jako toroidní jádro dynamoplechů, je znázorněn na Obr. 3.5. Indukované napětí lze rozepsat a upravit do vztahu [24]

$$u(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} = NS_{Fe} \frac{dB(t)}{dt} = NS_{Fe} \frac{d}{dt} (B_{\max} \sin \omega t) = NS_{Fe} B_{\max} \omega \cos \omega t = U_{\max} \cos \omega t , \quad (24)$$

kde $B_{\max}$ je střední amplituda magnetické indukce. Na základě předešlého vztahu lze psát hodnotu efektivního napětí [24]

$$U = U_{ef} = \frac{NS_{Fe} B_{\max} \omega}{\sqrt{2}} . \quad (25)$$

Ekvivalentní vířivý odpor R_v musí vyhovovat vztahu [24]

$$R_V = \frac{U^2}{P_V} = \frac{N^2 S_{Fe}^2 B_{\max}^2 \omega^2}{2P_V}. \quad (26)$$

Na základě vztahu získaného po složitých algebraických úpravách (uvedených v [24]) z povrchové hodnoty činného Poyntingova vektoru a vynásobeného povrchem plechu, lze vyjádřit vířivý výkon tvarem [24]

$$P_V = V_{Fe} \frac{\omega^2 B_{\max}^2 d^2}{8\rho} \cdot \frac{\delta}{d} \frac{\sinh \frac{d}{\delta} - \sin \frac{d}{\delta}}{\cosh \frac{d}{\delta} - \cos \frac{d}{\delta}} = S_{Fe} l_{Fe} \frac{\omega^2 B_{\max}^2 d^2}{8\rho} \cdot \frac{\delta}{d} \frac{\sinh \frac{d}{\delta} - \sin \frac{d}{\delta}}{\cosh \frac{d}{\delta} - \cos \frac{d}{\delta}}. \quad (27)$$

Po dosazení vztahu (27) do (26) vznikne vztah [24]

$$R_V = R_V(\omega) = \frac{4N^2 \rho S_{Fe}}{d^2 l_{Fe}} \cdot \frac{d}{\delta} \cdot \frac{\cosh \frac{d}{\delta} - \cos \frac{d}{\delta}}{\sinh \frac{d}{\delta} - \sin \frac{d}{\delta}}. \quad (28)$$

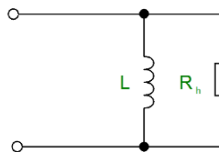
Vířivý odpor je kmitočtově závislý na hloubce vniku δ . Ekvivalentní odpor uvažovaného svazku plechů lze vypočítat při dosazení a uvažování pouze jednoho závitu ($N = 1$). Dosazením skutečného počtu závitů lze provést přepočtení odporu na primární stranu náhradního zapojení [24].

3.7 Komplexní permeabilita

Komplexní permeabilita je veličina definovaná pouze pro harmonické signály, protože nelze sestavit komplexní impedanci neharmonického signálu. Skládá se z reálné části μ' , přímo měřitelné na nízké frekvenci, a imaginární části μ'' , která se objevuje právě na vyšších frekvencích. Při nízké frekvenci je imaginární část zanedbatelná, a proto se dá říci, že imaginární složka komplexní permeability představuje ztráty na vyšších frekvencích. Komplexní permeabilitu lze vyjádřit vztahem [24]

$$\bar{\mu}_r = \text{Re}\{\bar{\mu}_r\} - j \text{Im}\{\bar{\mu}_r\} = \mu' - j\mu''. \quad (29)$$

Měření komplexní permeability je komplikované, protože cívku je nutné napájet pouze harmonickým signálem. Zjištění komplexní permeability se obvykle využívá pro posouzení velikosti ztrát feritových materiálů na vysokých kmitočtech. Tyto materiály mají velmi malou elektrickou vodivost a vířivé proudy se zde nevyskytují. U feritů proto reálná část odpovídá skutečné permeabilitě materiálu a imaginární část představuje pouze hysterezní ztráty, protože ztráty vířivými proudy se jsou zde zanedbatelné. K odvození vztahů pro výpočet komplexní permeability u feritů, je vhodné použít náhradní zapojení měření cívky, které obsahuje k měření cívce paralelní odpor R_h , jenž reprezentuje hysterezní ztráty [24].



Obr. 3.8 Zjednodušené náhradní zapojení

Na základě zjednodušení v náhradním zapojení lze celkovou impedanci zapsat [24]

$$\begin{aligned}
 Z &= j\omega L \frac{R_h}{j\omega L + R_h} \cdot \frac{j\omega L - R_h}{j\omega L - R_h} = j\omega L \frac{j\omega L R_h - R_h^2}{-(\omega L)^2 - R_h^2} \cdot \frac{-\frac{1}{R_h^2}}{-\frac{1}{R_h^2}} = j\omega L \frac{-\frac{j\omega L}{R_h} + 1}{\frac{(\omega L)^2}{R_h^2} + 1} = \\
 &= j\omega L \left[\frac{1}{1 + \frac{(\omega L)^2}{R_h^2}} - j \frac{\frac{\omega L}{R_h}}{1 + \frac{(\omega L)^2}{R_h^2}} \right] \approx j\omega \bar{L}
 \end{aligned} \tag{30}$$

Z předchozího vztahu je patrné, že uměle zavedená indukčnost $\bar{L}$ měřené cívky je definována vztahem [24]

$$\bar{L} = L \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega L}{R_h} \right)^2} - j \frac{\frac{\omega L}{R_h}}{1 + \frac{(\omega L)^2}{R_h^2}} \right] = N^2 \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}} \mu_0 \mu_{r,nf} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega L}{R_h} \right)^2} - j \frac{\frac{\omega L}{R_h}}{1 + \frac{(\omega L)^2}{R_h^2}} \right], \tag{31}$$

kde $\mu_{r,nf}$ je relativní permeabilita pro nízké frekvence. Stejnou komplexní indukčnost $\bar{L}$ měřené cívky lze vyjádřit pomocí komplexní permeability $\bar{\mu}_r$ [24]

$$\bar{L} = N^2 \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}} \mu_0 \mu_r = N^2 \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}} \mu_0 [\mu'_r(\omega) - j\mu''_r(\omega)] = N^2 \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}} \mu_0 \mu_{r,nf} \left[\frac{\mu'_r(\omega)}{\mu_{r,nf}} - j \frac{\mu''_r(\omega)}{\mu_{r,nf}} \right]. \tag{32}$$

Následným porovnáním reálných a imaginárních členů v závorkách u předchozích vztahů lze dojít k výrazům pro poměrné hodnoty reálné

$$\frac{\mu'_r(\omega)}{\mu_{r,nf}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega L}{R_h} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^2} \tag{33}$$

a imaginární části

$$\frac{\mu''_r(\omega)}{\mu_{r,nf}} = \frac{\frac{\omega L}{R_h}}{1 + \left(\frac{\omega L}{R_h} \right)^2} = \frac{\frac{\omega}{\omega_m}}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^2} \tag{34}$$

komplexní permeability [24], kde mezní kmitočet odpovídá vztahu

$$\omega_m = \frac{R_h}{L}. \tag{35}$$

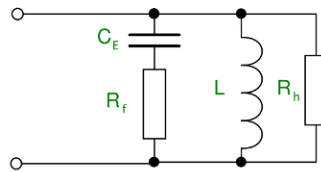
Vztahy (33) a (34) nejsou při porovnání s měřením komplexní permeability dostatečně přesné a je nutné pro přesnější vyjádření provést další úpravy viz [24]. Na základě vztahu (33) u reálné části permeability chybí rezonanční převýšení na mezním kmitočtu a u vztahu (34) imaginární část chybně lineárně klesá směrem k nízkým kmitočtům. Vzhledem k odchylkám mezi teoretickými a změřenými hodnotami plyne, že odpor R_h , který představuje hysterezní ztráty, musí být frekvenčně závislý, viz Obr. 3.9, kde R_f je tlumicí odpor a C_E je ekvivalentní kapacita, která představuje moment setrvačnosti mikroskopických objektů uložených v krystalové mřížce materiálu (např. atomů, které lze otáčet). K udržení konstantní amplitudy ψ_m magnetického toku je nutné udržet konstantní poměr U/ω . Ke zdůvodnění lze vyjít ze vztahu [24]

$$\psi(t) = \int u(t) dt = \int U_{\max} \cos \omega t dt = \frac{U_{\max}}{\omega} \sin \omega t = \psi_{\max} \sin \omega t. \quad (36)$$

Pro udržení konstantní amplitudy toku $\psi_{\max}$ plyne přímá úměra mezi napětím a kmitočtem

$$U_{\max} = \psi_{\max} \omega = \psi_{\max} 2\pi f. \quad (37)$$

Když by byla konstantní amplituda toku $\psi_{\max}$, tak by hysterezní smyčka měla na všech frekvencích konstantní výšku i šířku $\Rightarrow$ plochu. Z toho důvodu musí být hysterezní ztráty P_h úměrné první mocnině kmitočtu ω .



Obr. 3.9 Upřesněné základní zapojení pro přesnější výpočet komplexní permeability

Pro výpočet hysterezních ztrát z náhradního zapojení dostáváme vztah [24]

$$P_h = \frac{U_{ef}^2}{R_h} = \frac{1}{2} \frac{U_{\max}^2}{R_h} = \frac{1}{2} \frac{\psi_{\max}^2 \omega^2}{R_h} = \frac{1}{2} \frac{\psi_{\max}^2 \omega^2}{R_{h0} \frac{\omega}{\omega_0}} = \frac{1}{2} \frac{\psi_{\max}^2 \omega^2}{R_{h0}} \omega, \quad (38)$$

kde náhradní odpor R_h je přímo úměrný kmitočtu (41) a R_{h0} je hodnota odporu na zvoleném vztažném rezonančním kmitočtu ω_0 [24].

$$R_h = R_{h0} \frac{\omega}{\omega_0} \quad (39)$$

3.8 Výpočty v Ansys Maxwell

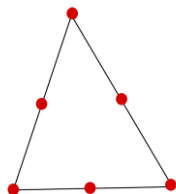
Ansys Maxwell je komplexní simulační program, který využívá ke svým výpočtům metodu konečných prvků. Lze zde řešit různé statické i elektromagnetické výpočty. Základem je vždy vytvoření geometrie testovaného tělesa, kde se následně nastavují další parametry důležité pro výpočet např. vlastnosti použitého materiálu, hraniční podmínky a buzení. V oblasti výpočtu je nejdůležitější nejprve vytvořit prvkovou síť, kterou lze buď nechat vygenerovat automaticky, nebo ručně nastavit dle požadavků. Automaticky generovaná síť nebývá většinou dostatečně kvalitní, a proto je nutné ji ručně nastavovat. Na základě zadaných parametrů program vytvoří

v zadané oblasti výpočetní body, které spojuje do trojúhelníků. Kvalitně vytvořená síť by neměla obsahovat trojúhelníkové útvary s příliš ostrými ani tupými úhly, a navíc být v dostatečném rozlišení, protože kvalita sítě významnou měrou ovlivňuje následné výpočty. Požadované pole [31] je v každém elementu aproximováno polynomem 2. řádu

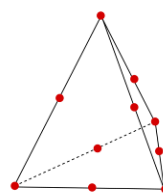
$$A_z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (40)$$

Následný výpočet ve 2D je prováděn dle Obr. 3.10, u každého trojúhelníku v 6 bodech (3 rohy a 3 střední body každé strany).

Ve 3D simulacích využívá Maxwell jako základní tvar místo trojúhelníku tetrahedron neboli čtyřstěn, ze kterého vytváří celkovou výpočetní síť. Výpočty se zde provádí v několika bodech každého tetrahedronu Obr. 3.11. Tangenciální pole k jeho okrajům, se ukládá v jeho vrcholcích. Části pole, které jsou tangenciální ke stěně prvku a zároveň normálové k některé stěně se ukládají do středu dané hrany. A samozřejmě hodnoty vektorového pole uvnitř prvku jsou interpolovány do uzlových hodnot [48].



Obr. 3.10 Trojúhelník



Obr. 3.11 Tetrahedron

Hledané pole je v každém prvku opět aproximováno upraveným kvadratickým polynomem druhého řádu

$$H_x(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5yz + a_6xz + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2. \quad (41)$$

V Maxwellu je možné vytvářet několik druhů simulací, ale nejčastěji využívané jsou pro výpočty elektrických strojů, magnetostatická a transientní analýza. Magnetostatická simulace je proti transientní simulaci velmi rychlá, protože se zde počítá pouze jeden stav polí v simulovaném objektu. Nevýhodou statické simulace je ovšem, že se zde neobjevují vířivé proudy a simuluje se pouze jeden izolovaný časový okamžik. Transientní simulace umožňuje simulování i přechodových dějů a vířivých proudů. U tohoto typu simulace je nutné brát zřetel na správné nastavení simulačního kroku, který se nastavuje s ohledem na velikost napájecí frekvence a mechanických otáček.

Výpočty v magnetostatice se provádí na základě Poissonova (42) a dalších vztahů uvedených v literatuře [31]

$$\nabla^2 A = -\mu J. \quad (42)$$

V rámci výpočtu konečných prvků se uplatňuje použití matic, které mohou být vypočteny za použití standardních technik pro řešení matic např. Sparse Gaussian Elimination (přímý řešič) nebo Incomplete Choleski Conjugate Gradient Method (ICCG iterační řešič). Chyby se v řešení MKP vyskytují díky četným zjednodušením a je nutné je průběžně sledovat a držet na minimální hodnotě. Aproximované řešení je nutné vložit zpětně do Poissonovy rovnice [31]

$$\nabla^2 A^{approx} + \mu J = R_{mxwl}, \quad (43)$$

kde A je kvadratická funkce a R_{mxwl} je v každém trojúhelníku konstantní. Lokální chyba v každém trojúhelníku je tedy úměrná R_{mxwl} . Pro přepočítání na chybovou energii se využívá součet jednotlivých chyb v každém trojúhelníku, který je nutné vydělit celkovou energií (TotalEnergy). Velikost této chyby představuje přesnost simulace [31].

$$PercentErrorEnergy = \sum_{i=1}^n \frac{|R_{mxwl}(local)_i|}{TotalEnergy} \times 100\% \quad (44)$$

Pro 3D výpočty s velikostí chyb je možné použít obdobné vztahy jak pro 2D výpočet. V reálných podmínkách platí vztah představující Maxwellovu rovnici, kde magnetický tok procházející skrz uzavřenou, orientovanou plochu je roven nule [48]

$$\nabla \bullet \vec{B} = 0. \quad (45)$$

Při kontrole vypočteného pole pomocí MKP lze, ale získat vztah, ve kterém již magnetický tok procházející skrz uzavřenou orientovanou plochu roven nule není viz[48]

$$\nabla \bullet \vec{B}_{rešeni} = err \quad (46)$$

Výsledný vztah pro výpočet procentuální chyby výpočtu tedy vychází z podílu získané chybové energie ze vztahu (46) a celkové vypočtené energie [48]

$$PercentErrorEnergy = \frac{ErrorEnergy}{TotalEnergy} \times 100\% \quad (47)$$

Velikost chyby je získána pro každý adaptivní průchod společně s celkovou energií. Jejím přepočtem lze následně kontrolovat konvergenci řešení. Lokální velikosti chyb mohou být větší, protože se vztah (47) převážně uplatňuje globálně [48].

3.8.1 Výpočty polí

Při magnetostatické analýze se neuplatňují žádné časové změny v simulovaném modelu a všechny objekty jsou považovány za stacionární. Jediná transformace energie, která se zde vyskytuje, jsou ohmické ztráty spojené s průchodem proudu reálným vodičem. Výpočty jsou založené na Ampér-Maxwellově zákonu a Gaussově rovnici magnetického pole [29].

Transientní analýza umožňuje modelování magnetických polí a přechodových dějů, což přináší delší trvání simulace a nutnost nastavení dalších parametrů. Minimální počet vzorků pro získání orientačních výsledků je 50 na periodu napájení. Pro získání správných výsledků je vhodné nastavit vzorkování alespoň 200 vzorků na periodu napájecí frekvence. Maximální počet vzorků, které adekvátně zpřesní výsledky vzhledem k trvání simulace je 400 vzorků na periodu. Další zvyšování počtu vzorků nemá u většiny simulovaných strojů pro běžné použití smysl a vede pouze k prodloužení výpočetního času. Při simulování strojů s vysokou účinností nebo pro vyšší otáčky, tak je samozřejmě možné nastavit větší počet vzorků, ale čas výpočtu se extrémně prodlouží. Vyšším vzorkováním dojde k zohlednění vyšších harmonických frekvencí, které způsobují vířivé proudy, nepodílí se na tvorbě momentu a je vhodné je sledovat právě u těchto typů strojů.

Dále je možné zkrátit délku výpočtu simulací ve 2D místo ve 3D, pokud je to možné. Zjednodušením zrychlujícím výpočet je i simulace pouhé výseče stroje za předpokladu, že ostatní části stroje jsou symetrické. Metody konečných prvků také neumožňují simulovat zaoblené hrany a každou takovou hranu musí rozsekat na menší hrany proložené rovnými čarami. Kde je to možné tak je vhodné se kulatým tvarům vyhnout. U napájecího vinutí je také možné zjednodušit simulovaný model tím, že se nebudou vytvářet jednotlivé budící vodiče, ale použije se plocha podobné velikosti a počet vodičů se nastaví až programově přímo v nastavení vlastností daného objektu.

3.8.2 Výpočet celkových magnetických ztrát

Maxwell využívá k výpočtům celkových magnetických ztrát v měkkých magnetických materiálech Steinmetzovu rovnici [29, 31]

$$P_{mag} = P_h + P_v + P_d = K_h B_{max}^2 f + K_v (B_{max} f)^2 + K_d (B_{max} f)^{1.5} = K_1 B_{max}^2 + K_2 B_{max}^{1.5}, \quad (48)$$

kde K_h je koeficient hysterezních ztrát, K_v koeficient vířivých ztrát, K_d koeficient přídavných ztrát, B_{max} je maximální magnetická indukce a f je frekvence [29]

$$K_1 = K_h f + K_v f^2 \quad (49)$$

$$K_2 = K_d f^{1.5} \quad (50)$$

Ztráty vířivými proudy lze vypočítat i přímo dle vztahu

$$K_v = \pi^2 \cdot \sigma \cdot \frac{d^2}{6}, \quad (51)$$

kde σ je vodivost a d je tloušťka jednoho kusu plechu. Minimalizací kvadratické formy dostaneme K_1 a K_2 [29]

$$f(K_1, K_2) = \sum [P_{vi} - (K_1 B_{max i}^2 + K_2 B_{max i}^{1.5})]^2 = \min, \quad (52)$$

kde P_{vi} , $B_{max i}$ jsou vždy daná data získaná měřením ze ztrátové křivky materiálu. Zbylé ztrátové koeficienty hysterezních ztrát lze získat [29]

$$K_h = \frac{K_1 - K_v f_0^2}{f_0}, \quad (53)$$

a vířivých ztrát

$$K_d = \frac{K_2}{f_0^{1.5}}, \quad (54)$$

kde f_0 je testovací frekvence ztrátové křivky z původního měření [29].

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 [33]. Vlastní výpočet je možné realizovat na základě operací s maticemi [35]. Základní vztah pro výpočet magnetických koeficientů

$$P = P_h + P_v + P_d = K_h B_{\max}^2 f + K_v (B_{\max} f)^2 + K_d (B_{\max} f)^{1.5}, \quad (55)$$

lze přepsat na

$$\bar{y} = \mathbf{Z} \bar{c}, \quad (56)$$

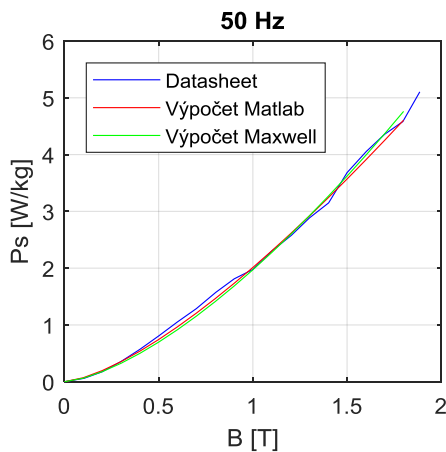
kde $\bar{y}$ je vektor celkových magnetických ztrát, $\mathbf{Z}$ je matice ve které lze pod každým členem najít součin frekvence a magnetické indukce a $\bar{c}$ jenž reprezentuje ztrátové koeficienty K_h , K_v , a K_d . Maticová forma zápisu je znázorněna níže

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^2 B_{\max,1}^2 & f_1^2 B_{\max,1}^2 & f_1^{1.5} B_{\max,1}^{1.5} \\ f_2^2 B_{\max,2}^2 & f_2^2 B_{\max,2}^2 & f_2^{1.5} B_{\max,2}^{1.5} \\ f_3^2 B_{\max,3}^2 & f_3^2 B_{\max,3}^2 & f_3^{1.5} B_{\max,3}^{1.5} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_n^2 B_{\max,n}^2 & f_n^2 B_{\max,n}^2 & f_n^{1.5} B_{\max,n}^{1.5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (57)$$

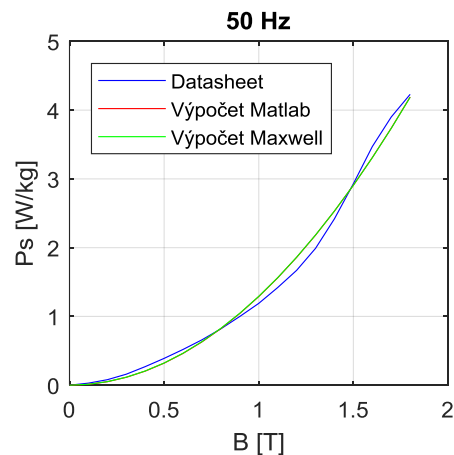
Výsledný vztah pro zjištění hledaných koeficientů (58) je nutné upravit, aby bylo matematicky provést výpočet, protože matice $\mathbf{Z}$ není čtvercová.

$$\bar{c} = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^T \bar{y} \quad (58)$$

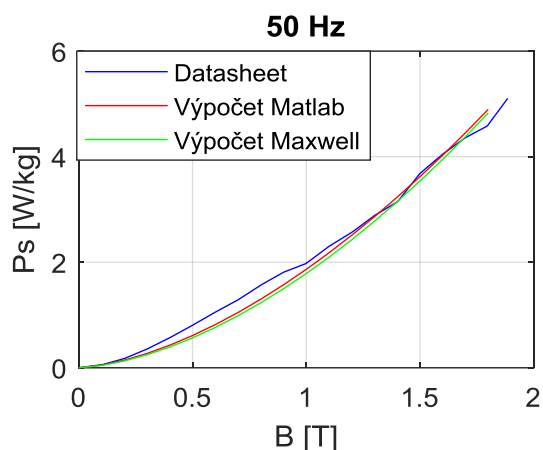
Vynásobením transponovanou maticí je zajištěna podmínka čtvercové matice, ke které lze nalézt inverzní matici. V grafech na obrázcích níže lze nalézt porovnání ztrátových křivek získaných z měření na neorientovaném plechu M330-35A s vlastními vypočtenými křivkami a křivkami získanými z programu Ansys Maxwell. Použité frekvence ztrátových křivek od výrobce Cogent byly 50, 100, 200, 400 a 1000 Hz. Při výpočtu ztrátových křivek u laserovaného materiálu byly použity frekvence 50, 100, 200, 300, 400, 500 a 1000 Hz. Následně se do simulace elektrického stroje zadají ztrátové koeficienty, které nejvíce odpovídají reálným změřeným hodnotám v požadovaném rozsahu magnetické indukce.



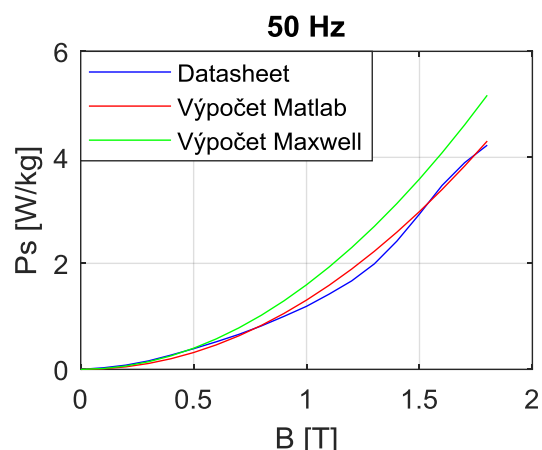
Obr. 3.12 Porovnání BP křivek pro 50 Hz
M330-35A Laser – 2 frekvence 50 a 100 Hz



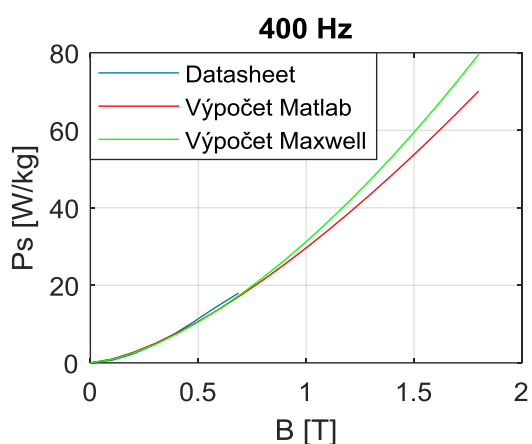
Obr. 3.13 Porovnání BP křivek pro 50 Hz
M330-35A Cogent – 2 frekvence 50 a 100 Hz



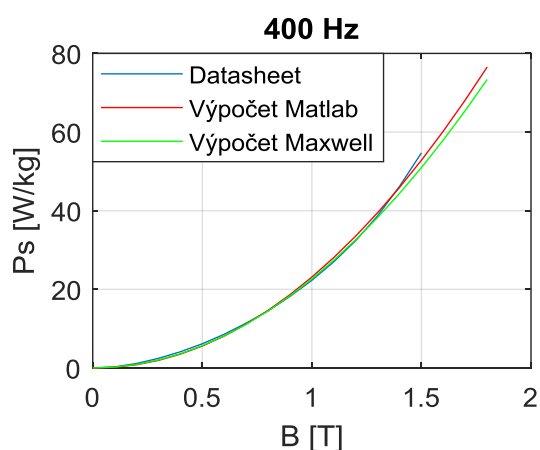
Obr. 3.14 Porovnání BP křivek pro 50 Hz
M330-35A Laser – 7 frekvencí



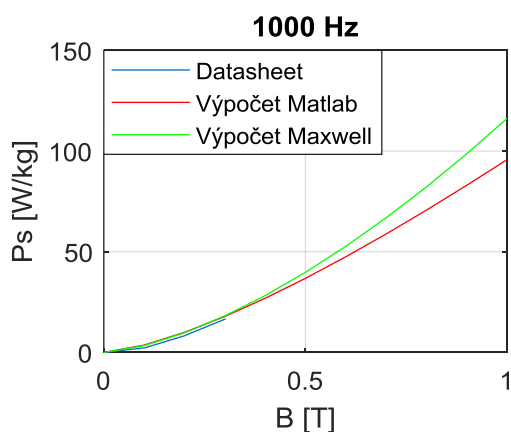
Obr. 3.15 Porovnání BP křivek pro 50 Hz
M330-35A Cogent – 5 frekvencí (Matlab
upraven)



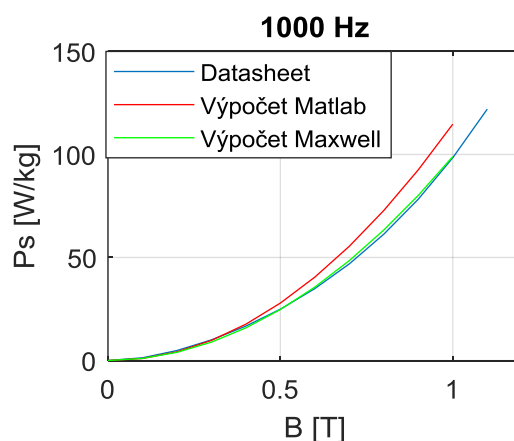
Obr. 3.16 Porovnání BP křivek pro 400 Hz
M330-35A Laser – 7 frekvencí



Obr. 3.17 Porovnání BP křivek pro 400 Hz
M330-35A Cogent – 5 frekvencí



Obr. 3.18 Porovnání BP křivek pro 1000 Hz
M330-35A Laser – 7 frekvencí



Obr. 3.19 Porovnání BP křivek pro 1000 Hz
M330-35A Cogent – 5 frekvencí

4 ŘEŠENÍ

Pro správnou identifikaci velikosti ztrát v elektrických strojích je nutné znát kromě vlastností materiálů i přesnost měření, která budou na testovaném materiálu prováděna. Správné nastavení simulace hraje v konstrukci elektrických strojů zásadní roli. Elektromagnetický výpočet a různé tvary statoru i rotoru, mohou být optimalizovány např. genetickými algoritmy. V současnosti je největší prostor při hledání vyšší účinnosti pro zvyšování kvality použitého materiálu nebo nalezení nových materiálů. Vzhledem k tomu, že magnetická měření jsou zdrojem spousty nejistot, je vhodné se jimi zabývat podrobněji.

4.1 Chyba magnetických měření

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

- a) Ve tvaru uzavřeného magnetického obvodu, bez vzduchových mezer [9].
- b) S přesně definovanými geometrickými rozměry [9].
- c) S přesně definovaným způsobem výroby vzorku (různé mechanické nebo laserové způsoby).
- d) S přesně definovanou přípravou vzorku k měření (např. upnutí do držáku) nebo další metody zpracování materiálu mohou měnit magnetické vlastnosti materiálu.
- e) Při vlastním měření nesmí docházet k výrazným změnám teploty (teplota nesmí překročit 50 °C) a mechanickému namáhání [53].

Pokud nedojde k dodržení všech výše zmiňovaných zásad, tak je magnetické měření nereprodukovatelné. Vířivý odpor R_v je závislý tvaru měřeného vzorku tedy na poměru S_{Fe}/l_{Fe} . Díky tomu mají dva vzorky různého tvaru různé dynamické hysterezní křivky, i když jsou vyrobené ze stejného materiálu včetně výrobní šarže.

Z pohledu přípravy vzorku by vinutí toroidních vzorků mělo být rovnoměrně rozmístěno po obvodu vzorku, aby nedošlo k tvorbě rozptylového pole po přesycení materiálu s následným poklesem permeability. Sekundární vinutí musí být umístěno přímo na testovaný vzorek, aby se zabránilo zkreslování měření vlivem detekování magnetického rozptylového toku ve vzduchové mezeře mezi vinutím a vzorkem. Primární vinutí musí být umístěno přímo na sekundárním vinutí. Každé z těchto vinutí vytváří kruhový závit s průměrem rovným střednímu průměru testovaného toroidu. Vinutí může vytvářet i další magnetický tok, který proudí v ose toroidu. Této chybě se lze vyhnout za předpokladu, že vinutí po obvodu testovaného vzorku bude vinuté ve dvou vrstvách. Z toho jedna vrstva bude vinutá po směru hodinových ručiček a druhá proti směru hodinových ručiček (jedná se o smysl navíjení vinutí kolem osy celého toroidu, a ne změně smyslu navíjení kolem testovaného jádra toroidu. Tento způsob navíjení také snižuje riziko chyby vlivem vzájemné indukčnosti mezi vinutími [25].

Kromě umístění a rozmístění vinutí je důležitý i počet závitů primárního vinutí a velikost průřezu testovaného vzorku. Ten by měl být takový, aby nedocházelo, vlivem Jouleových ztrát v budícím vinutí, k ohřívání testovaného vzorku. Po každém navinutí vzorku je nutné zkontrolovat vinutí vůči náhodnému zkratování na kostru testovaného vzorku či vzájemného zkratu mezi sebou. K průrazu izolace jakéhokoliv vinutí může dojít velmi jednoduše vlivem ostrých hran testovaného vzorku. Vzorek s proraženou izolací a zkratovaný na kostru nelze dále měřit a je nutné jej převinout. Z tohoto důvodu je vhodné vždy odstranit ostré hrany u testovaných vzorků

a používat primární vinutí s PVC izolací. Pouze lakovanou izolaci je možné použít u sekundárního vinutí, kde je menší počet závitů, teče zde minimální proud a tím pádem je zde i nižší riziko průrazu [25].

Mezi další důležitou věc patří sledovat poměr vnějšího a vnitřního průměru toroidu, který by neměl překročit hodnotu 1,4. Po jejím překročení je nutné přepočítat před měřením střední délku magnetického toku skrz železo l_{Fe} . Za normálních okolností se používá vztah [25]

$$l_{Fe} = \pi \cdot \frac{D_{out} + d_{in}}{2}, \quad (59)$$

kde D_{out} je vnější průměr a d_{in} vnitřní průměr toroidu. Jakmile dojde k překročení velikosti poměrů průměrů toroidu je nutné vztah upravit na

$$l_{Fe} = \pi \cdot \frac{D_{out} - d_{in}}{\ln\left(\frac{D_{out}}{d_{in}}\right)}. \quad (60)$$

Z těchto vztahů se následně možné vypočítat pro měření velikost intenzity magnetického pole H

$$H = \frac{N_1 I}{l_{Fe}}, \quad (61)$$

kde N_1 je počet primární závitů. Proud primárním vinutím je vhodné měřit přes bočník, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků vlivem napěťového úbytku a Jouleovým ztrátám na primárním vinutím. Mezi další výhodou patří i větší odolnost zařízení proti případným zkratům. Sekundární napětí lze buď integrovat elektronicky pomocí fluxmetru nebo přímo vzorkovat A/D převodníkem a integrovat numericky.

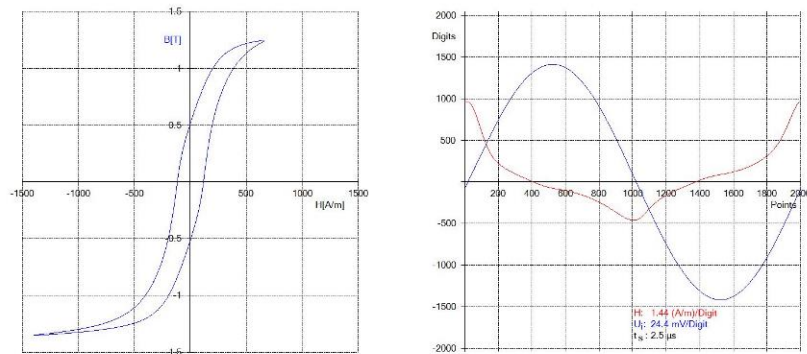
Pokud se toroidní vzorek skládá z plechů, je vhodné průřez magnetického obvodu počítat upraveným vztahem [25]

$$S_{Fe} = \frac{D_{out} - d_{in}}{2} \cdot h, \quad (62)$$

kde h je výška svazku. Za předpokladu znalosti hmotnosti a hustoty materiálu testovaného vzorku ho je možné také spočítat pomocí vztahu

$$S_{Fe} = \frac{2m_a}{\gamma\pi(d_{in} + D_{out})}. \quad (63)$$

Při vlastním měření je také nutné sledovat stejnosměrnou složku a snažit se jí vyvarovat vhodnou kompenzací formou vkládání korekční stejnosměrné složky, aby výsledný signál, obsahoval co nejmenší výslednou stejnosměrnou složku. I stejnosměrná složka v řádu 0,02 V může v závislosti na velikosti napájecího napětí vyvolat nesymetrii, až 30 % viz obrázky níže. Tato nesymetrie vede ke špatnému vyhodnocení měření a špatnému zobrazení hysterezní křivky.



Obr. 4.1 Chybná BH křivka vlivem DC složky

Jak je vidět, tak u magnetických měření vlastní výsledek ovlivňuje spousta faktorů, které nejdou úplně vždy zohlednit. Obecně při použití kvalitního měřicího přístroje, který je pravidelně výrobcem kalibrován, je výsledná chyba pro opakované měření u jednoho vzorku velmi malá obvykle v řádech desetin procent. V této práci je vypočtena relativní chyba a pouze nejistota typu A, protože nejistotu typu B nelze spolehlivě vypočíst pro měření magnetických parametrů. Nejistota typu A byla spočtena na základě 11 opakujících se měření se stejným nastavením přístroje, který pokaždé znovu nastavoval žádnou hodnotu magnetické indukce [54]. Nejistotu A lze získat na základě následujících vztahů [55, 56]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (64)$$

kde $\bar{x}$ představuje průměrnou hodnotu spočtenou na základě aritmetického průměru z předchozích měření, n je počet opakovaných měření, x_i představuje vždy hodnotu daného sčítaného měření. Vlastní nejistotu A vypočteme pomocí rozptylu hodnot s_x^2

$$u_A(x) = k_s \cdot s_x = k_s \cdot \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (65)$$

Hodnota k_s se určuje podle počtu měření n , viz následující tabulka. Pokud jich bylo 10 a více, tak $k_s = 1$.

Tabulka 4.1 Velikost koeficientu k_s v závislosti na počtu opakování měření n

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k_s	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7

Kromě této nejistoty byla nalezena i největší odchylka každé naměřené hodnoty od teoreticky správné průměrné hodnoty. Na základě maximální odchylky byl určen i teoretický rozptyl měřených hodnot odečtením maximální a minimální naměřené hodnoty v průběhu zmíněných 11 měření. Dále byla spočtena i hodnota maximální relativní chyby. Testované měření bylo provedeno pro materiál M250-35A pro sycení 0,5; 1,0 a 1,5 T.

Tabulka 4.2 Vypočtené velikosti chyb a nejistoty A pro 0,5 T

	Průměr	Maximální odchylka	Rozptyl měřené hodnoty	Maximální relativní chyba	Nejistota A	
B_r	212,3	1,3	2,0	0,60 %	0,3	mT
H_c	85,9	0,5	0,8	0,50 %	0,1	A/m
B_{max}	500,5	1,6	3,0	0,31 %	0,4	mT
H_{max}	358,7	1,3	2,0	0,35 %	0,2	A/m
P_s	0,944	0,012	0,018	1,22 %	0,002	W/kg
μ_r	1111,3	4,7	9,0	0,43 %	0,9	

Tabulka 4.3 Vypočtené velikosti chyb a nejistoty A pro 1,0 T

	Průměr	Maximální odchylka	Rozptyl měřené hodnoty	Maximální relativní chyba	Nejistota A	
B_r	249,4	2,4	4,0	0,95 %	0,4	mT
H_c	107,0	1,0	2,0	0,93 %	0,1	A/m
B_{max}	999,5	1,5	2,0	0,15 %	0,3	mT
H_{max}	750,2	1,9	3,0	0,24 %	0,3	A/m
P_s	2,165	0,025	0,040	1,13 %	0,005	W/kg
μ_r	1060,4	2,4	4,0	0,22 %	0,5	

Tabulka 4.4 Vypočtené velikosti chyb a nejistoty A pro 1,5 T

	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	A/m
P_s	4,037	0,088	0,130	2,16 %	0,015	W/kg
μ_r	309,7	2,3	3,0	0,73 %	0,3	

Jak je vidět v tabulkách výše, velikost chyby nekoresponduje úplně s velikostí sycení a závisí spíše na aktuálním nastavení měřicího přístroje.

Nejistota B

Mezi zdroje chyb u výpočtu nejistoty B patří:

- Chemické složení testovaného materiálu a způsob jeho zpracování výrobcem. Při srovnávacím měření je vhodné testovat materiál ze stejné šarže, a i tento materiál následně používat u navrhovaného stroje nebo strojů. Magnetické vlastnosti se mohou

měnit u stejného výrobce mezi jednotlivými šaržemi a je nutné u každé várky provést přeměření těchto vlastností.

- Způsob opracování do požadovaného tvaru. Existují různé metody opracování např. lis, laser, elektrojiskrové obrábění, vodní paprsek, nůžky apod. Každá z těchto metod mění výsledné parametry materiálu. Během laserování se sleduje hlavně výkon laserového paprsku a rychlost jeho pohybu. U ražení lisem zase rozhoduje ostrost razící hlavy, kdy tupá razící hlava na konci své životnosti bude materiál více mechanicky deformovat apod. Kromě způsobu opracování se zde projevuje i přesnost s jakou může daná metoda vyrobit testovaný vzorek.
- U magneticky velmi měkkých materiálů je důležitý způsob uskladnění a přepravy. Pokud by se dostal materiál do blízkosti magnetického pole, tak může opět dojít k jeho ovlivnění.
- Jelikož vlastní měření materiálu vychází ze znalosti geometrických rozměrů testovaného vzorku, tak výsledné měření ovlivní i zvolený geometrický rozměr a zvolený typ měření (otevřený nebo uzavřený vzorek). Z pohledu zpracování vzorků je výhodnější větší velikost vzorku. Velký vzorek se ale zase obtížněji připravuje na měření a vyžaduje výkonnější napájecí zdroj. Měření velkého vzorku může trvat déle, obzvláště pokud dojde k jeho ohřátí vlivem magnetických a Joulových ztrát ve vinutí. Následně je nutné počkat do vychladnutí testovaného vzorku na akceptovatelnou teplotu. Nevýhodou většího vzorku je také větší délka přívodních vodičů, které mohou opět zkreslit výsledek. U testovaných vzorků je také nutné pamatovat na vliv opracování z výroby. Tento vliv se projevuje hlavně u vzorků, kde jsou opracované hrany velmi blízko. Vlivy výroby lze pozorovat u toroidu přibližně do šířky mezikruží 10 mm. U větších šířek mezikruží není vliv výroby natolik patrný.
- Z měřitelných chyb je možné vzít v úvahu nepřesnost měření geometrických rozměrů posuvným měřítkem, kde je minimální měřitelná vzdálenost 0,1 mm a závisí kromě správného odečtu uživatelem, také na sklonu posuvného měřítka, pod jakým uživatel měří vzdálenost.
- U každého vzorku je nutné pro výpočet celkových magnetických ztrát zjistit jeho hmotnost. Laboratorní váha má obvykle minimální hodnotu od 0,01 g do 0,1 g. Samozřejmě i zde záleží na správném umístění vzorku na váhu, a i váha musí být položena na rovné podložce.
- Důležité je také adekvátní namotání vinutí, které by mělo být rovnoměrně rozložené po celé délce zkoumaného vzorku a pokud možno kolmé na magnetický tok a pravidelné. Přívodní vinutí ke vzorku by mělo být co nejkratší, aby se do měření nezanesla chyba vlivem parazitních indukčních smyček.
- U lakovaných vodičů je také důležité dostatečné očištění jejich konců od lakové izolace, aby zde nebyl velký přechodový odpor po připojení k napájení nebo měření.
- Mezi chyby měřicího přístroje patří přesnosti při měření napětí na primární a sekundární straně.
- Nepřesnost fluxmetru u použitého zařízení byla 0,1 % ze čtení $\pm 10^{-7}$ Vs.
- 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.

- 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.

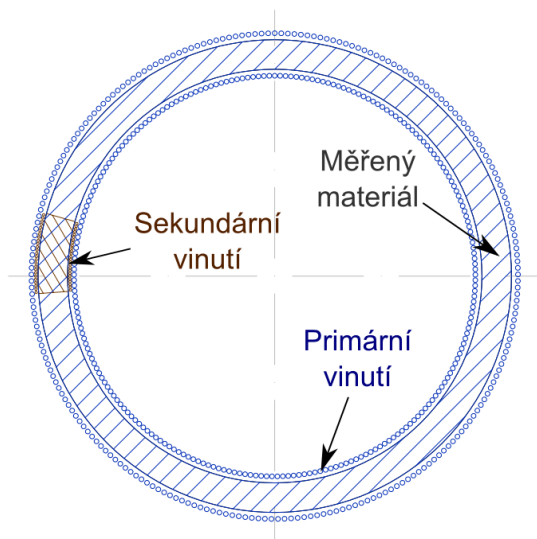
Měřicí stanoviště RemaCOMP–RemaGRAPH C–710 má tyto parametry [37, 57]:

- Signálový generátor s rozlišením 16bit a maximálním výstupním napětím ± 10 V.
- A/D převodník může mít vstupní napětí od $\pm 0,2$ do ± 42 V, maximální počet vzorků při maximální frekvenci 10 kHz je 500 vzorků.
- Výkonový zesilovač dokáže nastavit proud až ± 12 A, nebo napětí až ± 36 V při přibližném maximálním výkonu 400 W. Frekvence lze měřit v rozsahu 10 Hz – 10 kHz.
- Měřicí odpor je obvykle od $0,1 \Omega$ do 1Ω s přesností 0,1 % o maximální zátěži 10 W.

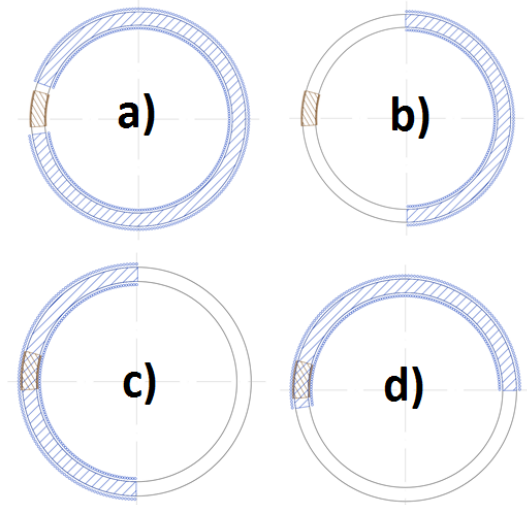
4.1.1 Rozložení vinutí

Ztráty ve vinutí neboli Jouleovy ztráty vznikají průchodem elektrického proudu ve vodiči. Počet závitů a průřez vodiče by měl být takový, aby nedocházelo k výraznějšímu ohřevu vzorku vlivem těchto ztrát. Vodič s velkým průměrem má sice menší hodnotu odporu, ale zase se obtížně navíjí na testovaný vzorek. Vinutí pak dokonale neobepíná testovaný vzorek a dochází ke zkreslení měření vlivem rozptylového toku. Dále je nutné obezřetně navíjet vinutí na testovaný vzorek v případě, že se na něm vyskytují ostré hrany, které mohou prorazit izolaci vodiče a vést ke zkratu na kostru vzorku. Z toho důvodu je vhodnější používat minimálně na primární vinutí vodič s PVC izolací, protože lakovaná izolace se snadněji proráží. Na sekundární vinutí je možné použít lakovaný vodič, aby nedošlo k přílišnému vzdálení primárního vinutí od testovaného vzorku vlivem závitů sekundárního vinutí a vzniku rozptylového toku. Pro kontrolu očištění konců lakovaného vodiče je vhodné jeho konce pocínovat, aby bylo ověřeno dokonalé odstranění lakované izolace. Při nanášení cínu může také dojít k nerovnoměrnému rozvrstvení cínu a následnému zkreslení měření odporu těchto vodičů, který lze zjistit multimetrem pomocí dvou vodičové metody (např. multimetr Agilent U1252B). Vzhledem k malému vlivu velikosti změřeného odporu na výsledné měření není nutné provádět přesnější měření odporu čtyřvodičovou metodou. Sekundárním vinutím protéká minimální proud, a proto výsledné zkreslení není až tak závažné. Navíc hodnota odporu sekundárního vinutí [25] se využívá při kvazistatickém měření a i zde může být přidána jenom příležitostně, protože pokud je odpor vodiče mnohem menší než vstupní odpor měřicího fluxmetru ($10k\Omega$), tak se nebere v úvahu a je automaticky v programu nastavená nulová hodnota.

Dle literatury [2, 24, 37] je doporučováno, aby sekundární vinutí bylo navinuto co nejtěsněji okolo průřezu měřeného vzorku. Primární vinutí by mělo být rovnoměrně rozmístěné po celém 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.

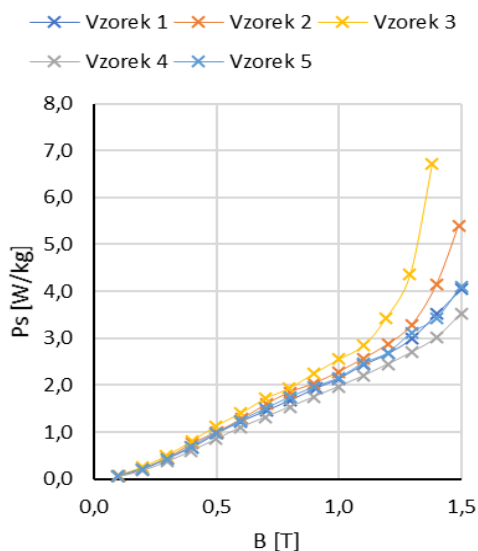


Obr. 4.2 Ukázka navinutého Vzorku 1

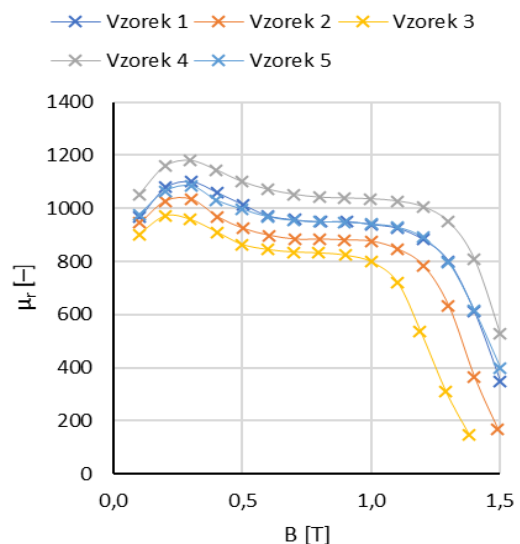


Obr. 4.3 Ukázka navinutých vzorků a) Vzorek 2, b) Vzorek 3, c) Vzorek 4 a d) Vzorek 5

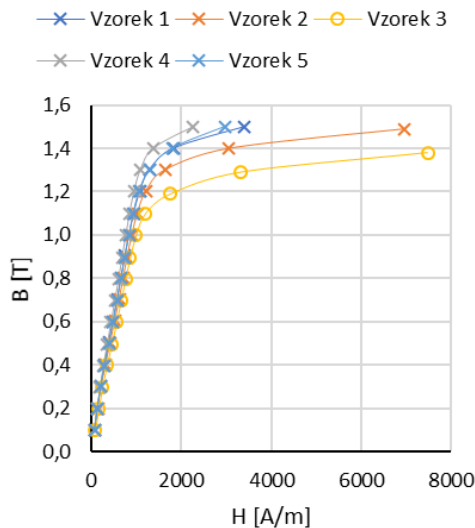
V rámci určení velikosti chyby bylo provedeno několik kontrolních měření na toroidech připravených laserem z neorientované oceli M250-35A. Vstupní parametry a rozměry byly – vnější průměr 80 mm, vnitřní průměr 70 mm, tloušťka svazku 5,25 mm, hmotnost 45,2 g a sekundární vinutí s počtem závitů 50. Počet závitů primárního vinutí byl pro Vzorek 1 – 233 závitů, Vzorek 2 – 205 závitů, Vzorek 3 – 143 závitů, Vzorek 4 – 139 závitů a Vzorek 5 – 154 závitů. Celkem bylo měřeno 5 vzorků s různě rozmístěným primárním vinutím Obr. 4.2 a Obr. 4.3. Vzorek 1 byl ideálně navinutý. Primární vinutí u dalších vzorků nebylo nikde úplné a lišilo se v umístění tohoto vinutí přes sekundární vinutí. Vzorek 2 a 3 neměly primární vinutí přes sekundární vinutí a Vzorek 4 a 5 měly umístěné primární vinutí přes sekundární.



Obr. 4.4 Celkové magnetické ztráty v závislosti na magnetické indukci při 50 Hz



Obr. 4.5 Relativní permeabilita v závislosti na magnetické indukci při 50 Hz



Obr. 4.6 Magnetizační charakteristika při 50 Hz

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 nenavínuté 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.

4.1.2 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, kde dochází ke zkreslení měření. Tento zdroj chyb je možné korigovat vztahem (66). Na základě tohoto vztahu byla pro tři různé velikosti toroidních vzorků dle Tabulka 4.5 vypočtena korekce magnetické indukce Obr. 4.7 Velikost odchylky magnetické indukce v závislosti na její nastavené velikosti Obr. 4.7. Data pro přepočítání byla použita z reálného měření těchto vzorků. Při výpočtu je uvažována izolace kolem testovaného vzorku v tloušťce 1 mm, než je navinuto sekundární vinutí. V reálné situaci dosahuje tloušťka PVC izolace obvykle do 0,5 – 1 mm.

V závislosti na velikosti magnetického pole je nutné uvažovat rozptylový tok mezi měřicím vinutím a vzorkem a měřenou magnetickou indukci přepočítat dle vztahu [25]

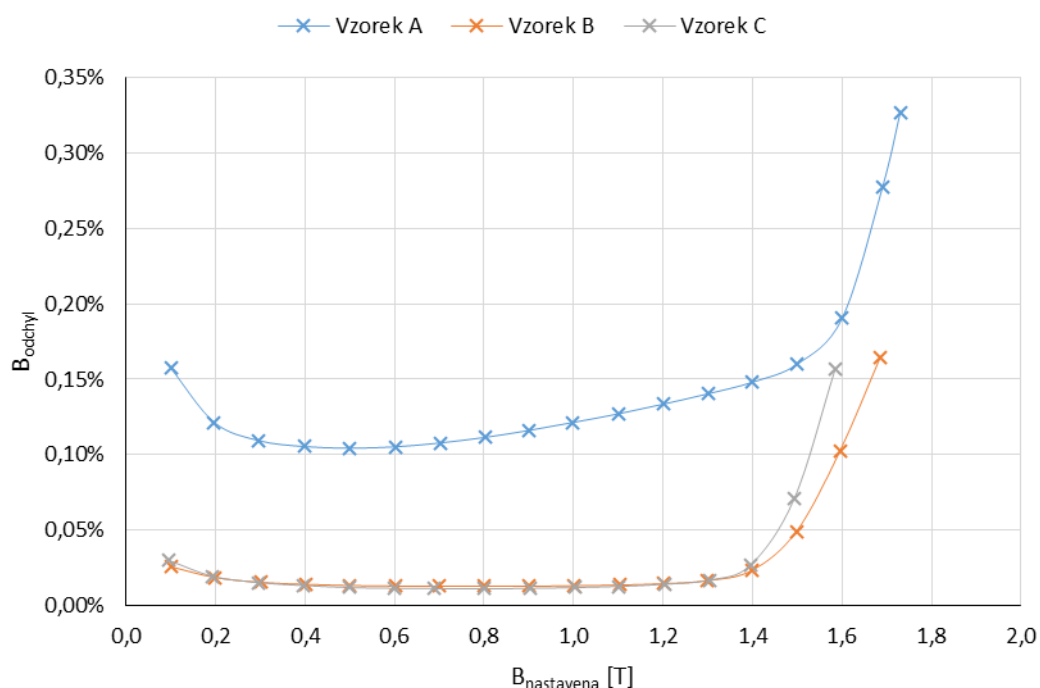
$$B_{\text{korekce}} = B - \mu_0 H \cdot \frac{S_{\text{vin}} - S_{\text{Fe}}}{S_{\text{Fe}}}, \quad (66)$$

kde S_{vin} je průřez, které obepíná sekundární vinutí, S_{Fe} je průřez vlastního testovaného vzorku.

Na graficky znázorněném průběhu relativní odchylky měření Obr. 4.7 lze zjistit, že chyba se pohybuje do hodnoty 0,2 % (magnetická indukce max 1,6 T) a je tedy za normálních okolností zanedbatelná. Chyba je větší pouze ze začátku měření, když se více projevuje napěťový DC offset a následně u konce měření, kdy dochází k přiblížení k maximálním rozsahům měřicího přístroje. Srovnání u různých vzorků prokázalo, že největší vliv rozptylového toku lze předpokládat u vzorku s malými geometrickými rozměry, kde je i relativně malá vzduchová mezera mezi vinutím a vzorkem už není zanedbatelná.

Tabulka 4.5 Parametry vzorků k testování kompenzace rozptylového toku

Parametry vzorků toroidů	Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C
Vnější průměr vzorku	40	100	368 [mm]
Vnitřní průměr vzorku	33,7	84	334 [mm]
Výška vzorku	5	8,1	4,7 [mm]
Průřez	15,8	64,8	79,9 [mm ²]
Izolace	1	1	1 mm
Vnější průměr s izolací	42	102	370 mm
Vnitřní průměr s izolací	35,7	86	336 mm
Výška s izolací	7	10,1	6,7 mm
Průřez s izolací	22,1	80,8	113,9 mm ²



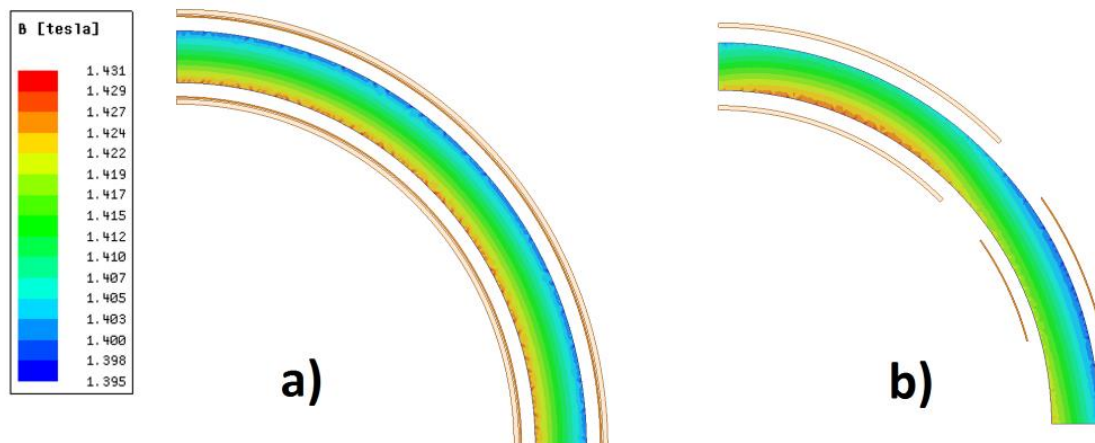
Obr. 4.7 Velikost odchylky magnetické indukce v závislosti na její nastavené velikosti

Když vezmeme v úvahu pouze jeden vzorek s těmito parametry: vnější průměr 120 mm, vnitřní průměr 105 mm, výška vzorku 7,5 mm, průřez materiálu vzorku 56,25 mm² a budeme u něj měnit vzdálenost vinutí v rozsahu 0,1 mm až 2 mm od vzorku, tak dostáváme velikost průřezu měřené plochy (vzorek + vzduch) 57,75 mm² až 86,25 mm². Velikost vypočtené odchylky lze nalézt v Tabulka 4.6. Z tabulky je patrné, že i 2 mm síla izolace z každé strany testovaného vzorku je relativně zanedbatelná. Chyba měřené magnetické indukce je pouze v řádu desetin procenta (0,36 %), což ve srovnání s dalšími vlivy je zanedbatelné.

Tabulka 4.6 Vypočtené odchylky velikostí magnetické indukce B v závislosti na tloušťce izolace

Tloušťka izolace		0,1 mm	0,2 mm	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm
$B_{\max}$ [T]	$H_{\max}$ [A/m]	B_{odchylka}	B_{odchylka}	B_{odchylka}	B_{odchylka}	B_{odchylka}
0,101	84	0,002 %	0,006 %	0,014 %	0,028 %	0,056 %
0,499	214	0,001 %	0,003 %	0,007 %	0,014 %	0,029 %
1,000	424	0,001 %	0,003 %	0,007 %	0,014 %	0,028 %
1,498	2376	0,003 %	0,011 %	0,027 %	0,053 %	0,106 %
1,595	5261	0,007 %	0,022 %	0,055 %	0,111 %	0,221 %
1,685	8930	0,012 %	0,036 %	0,089 %	0,178 %	0,355 %

Výpočet odchylky byl porovnán se simulací, kde se měnila vzdálenost sekundárního vinutí, a i zde se neprokázala žádná výraznější změna. Primární vinutí z důvodu nutnosti zachování stejné velikosti buzení bylo umístěno ve stejné vzdálenosti 2,4 mm. Průměr vodiče primárního vinutí je uvažován 0,7 mm a sekundárního vodiče 0,2 mm. Pro zjednodušení modelování nejsou modelované jednotlivé vodiče, ale pouze měděné proužky, do kterých je programově nastaven počet závitů pro primární stranu 63 vodičů a sekundární stranu 13 vodičů. Primárních vodičů bylo tedy uvažováno celkem 252 a sekundárních 52, z důvodu simulování pouze $\frac{1}{4}$ magnetického obvodu. K primárnímu vinutí je přiřazena i velikost odporu 0,555 Ω a sekundárnímu vinutí 0,4 Ω . Materiál použitý v simulaci byl M470-50A vyražený na lisu a původně měřený na toroidu s průměry 120/105 mm a tloušťkou 7,5 mm.

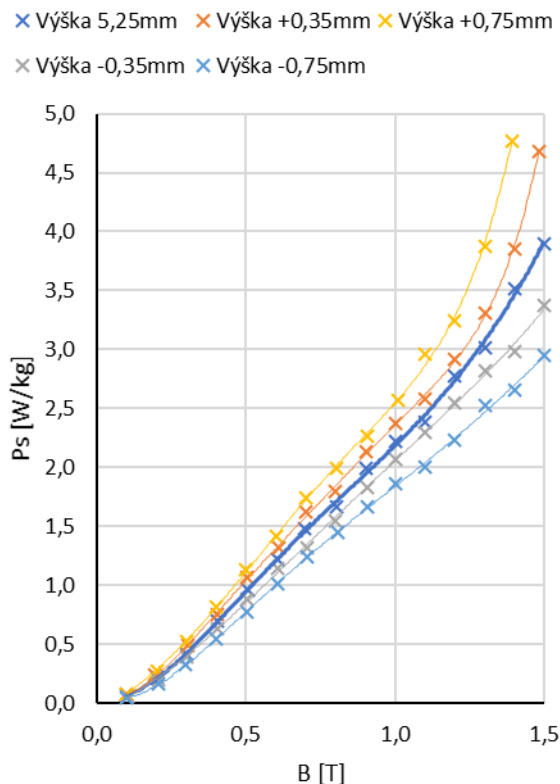


Obr. 4.8 Vzdálenost sekundárního vinutí a) 0,1 mm b) 2,0 mm + nerovnoměrné rozložení

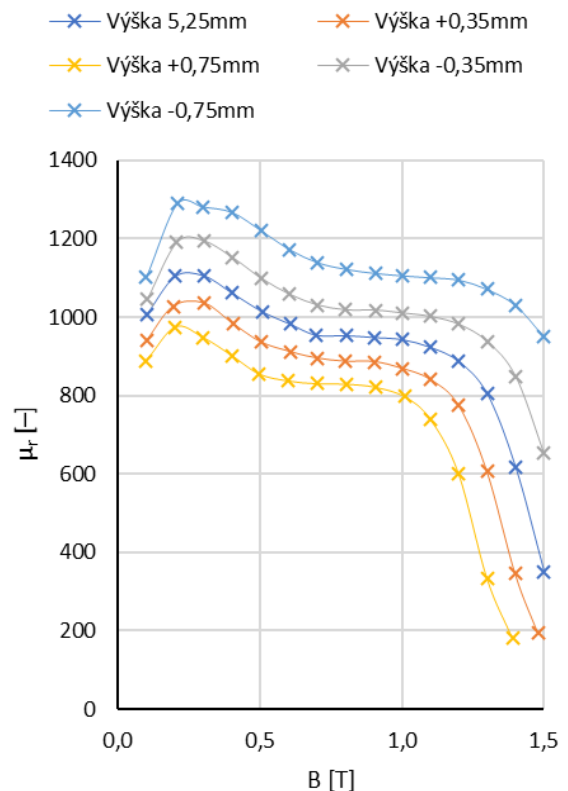
4.1.3 Vliv chybně zadaných vstupních parametrů

Při měření magnetických vlastností je velmi důležité správně změřit a zadat geometrické rozměry testovaných vzorků, včetně změření hmotnosti vzorku a spočítání množství závitů namotaných cívek. Ke vzniku chyby při měření průměru u testovaných vzorků dochází pouze výjimečně. Problém ovšem nastává při měření výšky testovaného vzorku, pokud se jedná o měření toroidního vzorku složeného z izolovaných dynamoplechů. Při výrobě žádaného tvaru obvykle dojde ke vzniku otřepů, které následně zkreslují měření výšky svazku plechů z daného toroidu. Díky otřepům výška obvykle naroste, což ovšem není správná výška svazku, protože svazek začne obsahovat malé vzduchové mezery, které následně zkreslí výsledné měření. Řešením by mohlo být stažení svazku plechů lisováním, ale tato úprava vnese do vzorku další

zkreslení díky vloženému mechanickému napětí [11, 58–60]. Samozřejmě se nabízí možnost odstranění těchto otřepů, ale tato úprava může způsobit částečné zkratování plechů mezi sebou. Otřepy samy o sobě neznamenají hned automatické zkratování plechů ve svazku, protože materiál je většinou pokrytý vrstvou oxidu, která slouží jako izolace a odstraněním otřepů dochází ke snížení izolačních vlastností plechů. Částečně se lze vyhnout zkratování poskládáním plechů ve stejném natočení, aby broušená strana u všech plechů byla orientovaná vždy stejným směrem. Izolační schopnost plechů už je i přesto snižena a snadněji dochází k jejich zkratování, protože izolaci obstarává pouze povlak o tloušťce několika mikrometrů. Jak se projeví odlišný průřez lze vidět na Obr. 4.9, Obr. 4.10 a Obr. 4.11.



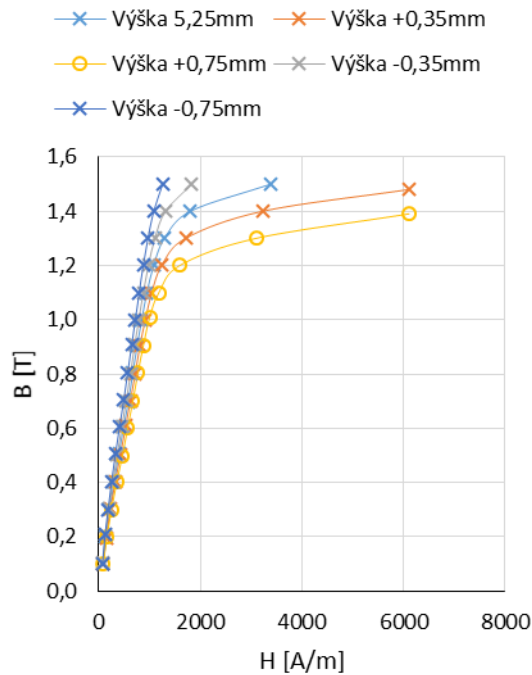
Obr. 4.9 Celkové magnetické ztráty pro rozdílnou výšku



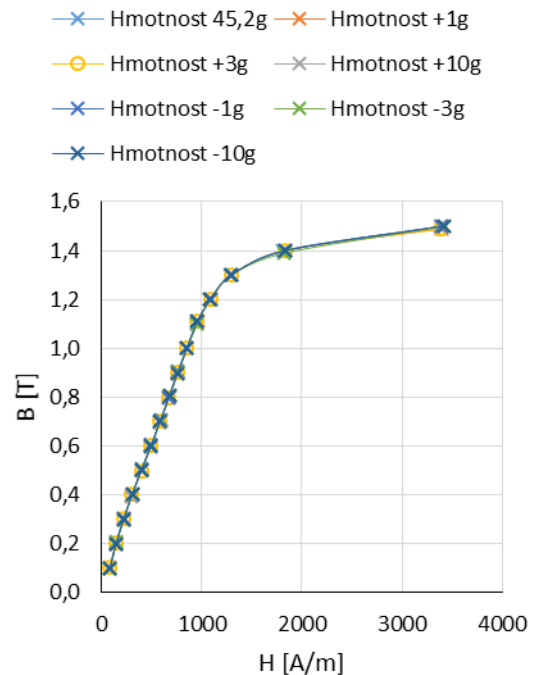
Obr. 4.10 Relativní permeabilita pro rozdílnou výšku

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 regulováno a nastavováno na velikost magnetické indukce. Správná výška toroidu je 5,25 mm a k značným odchylkám už dochází 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 veličinu, ale nejvíce to lze pozorovat u intenzity magnetického pole v nelineární oblasti, když je obvod přesycován.

Pokud dojde k chybě při určování hmotnosti Obr. 4.12, tak dle očekávání jsou ovlivněny pouze celkové magnetické ztráty přepočítávané na W/kg. Vlastní měřený ztrátový výkon zůstává stejný a chyba vzniká pouze při přepočtu na W/kg. Ostatní parametry zůstávají stejné, viz Příloha A (Obr. A. 1 a Obr. A. 2).



Obr. 4.11 Magnetizační křivky pro různou výšku



Obr. 4.12 Celkové magnetické ztráty pro rozdílnou hmotnost

Nejčastějším zdrojem chyb u testovaných toroidů bývá špatné spočítání počtu závitů sekundárního i primárního vinutí. Při navinutí 50 závitů už odchylka součtu o 5 závitů představuje relativní chybu 10 %. Ovšem odchylka o 5 závitů primárního vinutí při celkovém počtu 233 závitů představuje relativní chybu pouze 2,15 %, což se na měřených veličinách projeví v menší míře.

Tabulka 4.7 Teoretická velikost chyby v závislosti na počtu chybných závitů při různém celkovém počtu závitů

Počet chybných závitů	1	2	3	4	5
Celkový počet závitů	Relativní chyba	Relativní chyba	Relativní chyba	Relativní chyba	Relativní chyba
10	10,0 %	20,0 %	30,0 %	40,0 %	50,0 %
20	5,0 %	10,0 %	15,0 %	20,0 %	25,0 %
50	2,0 %	4,0 %	6,0 %	8,0 %	10,0 %
170	0,6 %	1,2 %	1,8 %	2,4 %	2,9 %
200	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %
233	0,43 %	0,86 %	1,29 %	1,72 %	2,15 %

Tabulka 4.8 Měřeno na frekvenci 50 Hz, sycení 1 T při obvyklé velikosti používaných sekundárních závitů, plech M470-50A

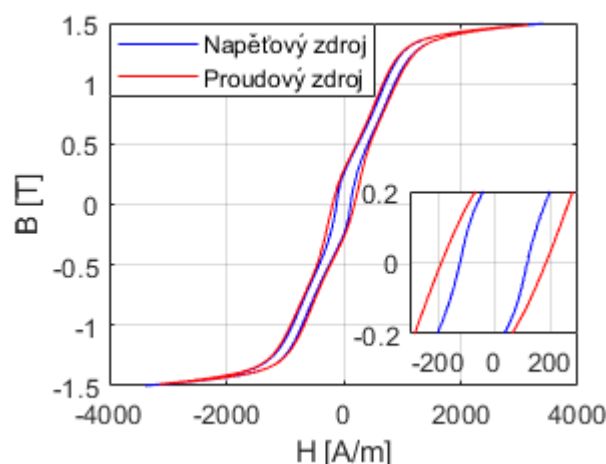
	Správný počet	Chybný počet					Relativní chyba			
N ₁	234	229	239	234	234		Chybný počet primárních závitů		Chybný počet sekundárních závitů	
N ₂	50	50	50	48	52					
B _r	0,711	0,710	0,710	0,719	0,701	0,1 %	0,0 %	1,1 %	1,4 %	T
H _c	87,0	85,1	88,8	85,0	89,0	2,2 %	2,0 %	2,3 %	2,3 %	A/m
H _{max}	226,2	221,2	231,2	208,8	246,6	2,2 %	2,2 %	7,7 %	9,0 %	A/m
P _s	1,95	1,91	1,99	1,89	2,00	2,3 %	2,1 %	3,0 %	2,8 %	W/kg
μ _r	3587	3666	3511	3901	3284	2,2 %	2,1 %	8,7 %	8,5 %	

Tabulka 4.9 Měřeno na frekvenci 50 Hz a sycení 1 T při nízkém počtu sekundárních závitů, plech M470-50A

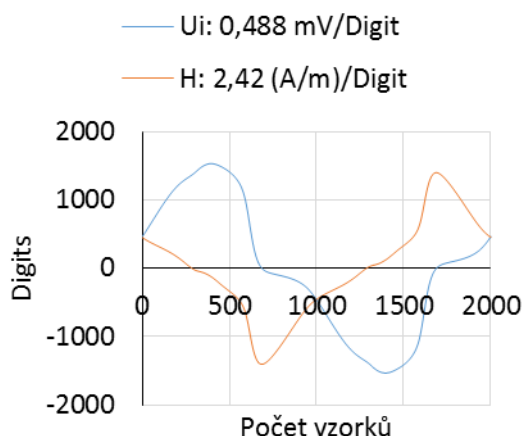
	Správný počet	Chybný počet					Relativní chyba			
N ₁	234	229	239	234	234		Chybný počet primárních závitů		Chybný počet sekundárních závitů	
N ₂	12	12	12	10	14					
B _r	0,709	0,709	0,710	0,740	0,668	0,0 %	0,2 %	4,3 %	5,7 %	T
H _c	86,9	85,0	88,8	78,8	94,7	2,2 %	2,2 %	9,4 %	9,0 %	A/m
H _{max}	218,8	213,0	222,8	154,0	330,8	2,7 %	1,8 %	29,6 %	51,2 %	A/m
P _s	1,94	1,90	1,99	1,71	2,19	2,2 %	2,4 %	11,8 %	12,8 %	W/kg
μ _r	3585	3666	3507	4976	2391	2,3 %	2,2 %	38,8 %	33,3 %	

Největší rozdíly se vyskytují opět nad 1,0 T. Jednotlivé průběhy a závislosti ztrát, relativní permeability a magnetické indukci na sycení lze vidět v Příloze A na Obr. A. 3, Obr. A. 4, Obr. A. 5, Obr. A. 6, Obr. A. 7 a Obr. A. 8.

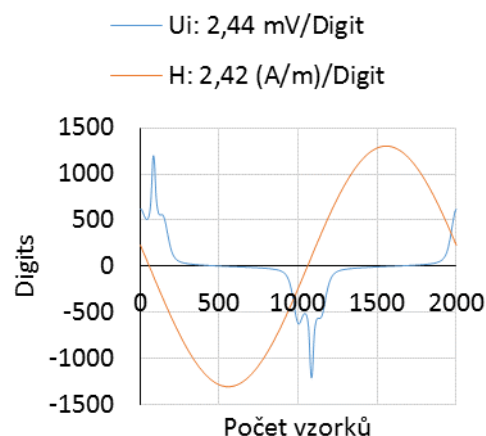
Velikost celkových měřených magnetických ztrát se také liší, jestli byl použit napěťový nebo proudový zdroj pro vybuzení magnetického toku. Z pohledu lepšího použití v praxi je vhodnější používat napěťový zdroj, protože běžně provozované elektrické stroje jsou připojeny právě k napěťovému zdroji. Když se použije proudový zdroj, tak u vyššího sycení nedochází k deformaci proudového průběhu jako u napěťového zdroje a tvar výsledné BH křivky je odlišný včetně velikosti celkových magnetických ztrát. Na grafech níže (Obr. 4.13, Obr. 4.14 a Obr. 4.15) lze pozorovat zjištěné rozdíly v šířce hysterezní křivky a tvaru časových průběhů indukovaného napětí a napájecího proudu. Srovnání velikosti ztrát, relativní permeability a magnetizační křivky lze nalézt v Příloze A (Obr. A. 9, Obr. A. 10 a Obr. A. 11). Výraznější odchylka byla zjištěna při nasycení magnetického obvodu, kdy velikost celkových magnetických ztrát byla u proudového zdroje výrazně vyšší. Na druhou stranu byla při srovnání relativní permeability zjištěna menší odchylka při nízkých hodnotách sycení.



Obr. 4.13 Hysterezní křivky pro napěťový a proudový zdroj pro 50 Hz



Obr. 4.14 Časové průběhy 50 Hz pro napěťový zdroj



Obr. 4.15 Časové průběhy 50 Hz pro proudový zdroj

4.1.4 Výsledky opakovaného měření

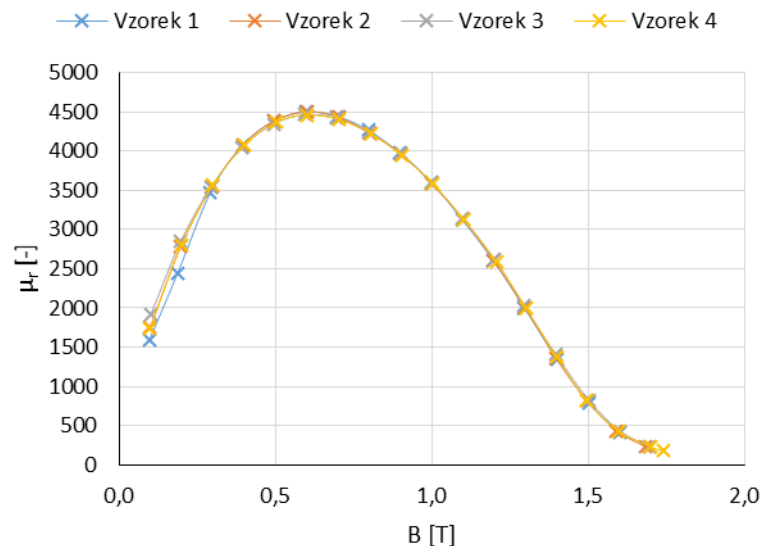
Magnetické vlastnosti neorientované oceli pro elektrotechniku M470-50A, byly otestovány několikrát v průběhu 2 let. Vzorek byl připraven vyražením mezikruží na lisu. Primární vinutí bylo několikrát převinuto, aby se vyloučila chyba špatným navinutím primárního vinutí.

Tabulka 4.10 Jednotlivá data měření s počtem závitů N_1 po přemotání

	Datum měření		Počet N_1
Vzorek 1	9.7.2015	23.3.2016	248
Vzorek 2	12.10.2016		243
Vzorek 3	8.12.2016		242
Vzorek 4	19.1.2017	19.1.2017 16.2.2017	234

Na základě změřených výsledků u ražení lisem v průběhu dvou let od vyražení nedošlo k žádné výraznější změně mechanického pnutí a výsledné parametry zůstaly stejné. Různé počty budících závitů neměly na měřené parametry žádný vliv. Vinutí bylo vždy navinuto rovnoměrně

po celém obvodu testovaného vzorku. Na základě drobné odchylky permeability při nižším sycení lze usuzovat, že po uvolnění pnutí zaneseného výrobou dojde pravděpodobně k mírnému zlepšení permeability při menším sycení než 1,0 T. Měření pro jednotlivé vzorky v daném roce byly téměř stejné a do grafu Obr. 4.16 byly vybrány pouze ty s největší odchylkou. Závislost ztrát a magnetizační křivku lze nalézt také v Příloze A Obr. A. 12 a Obr. A. 13.



Obr. 4.16 Závislost relativní permeability na sycení po několika letech

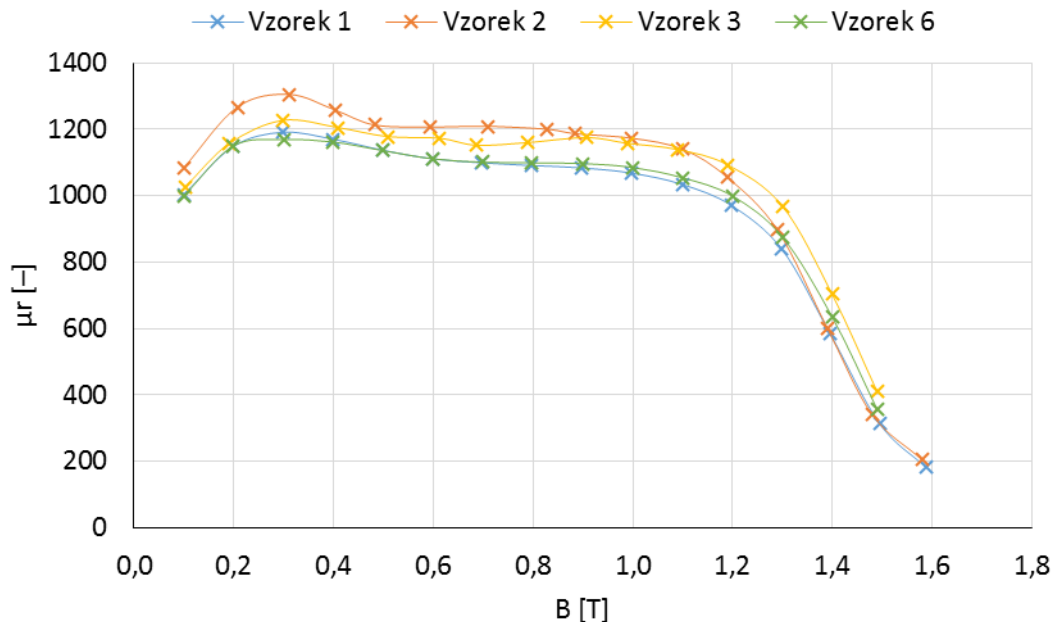
4.1.5 Vliv velikosti průřezu na magnetické vlastnosti

Při měření toroidních vzorků je teoreticky možné měřit magnetické vlastnosti dynamoplechů pouze na jednom plechu. Tato varianta měření má ovšem svá úskalí v tom, že budící vinutí rovnoměrně neobepíná měřený průřez a může dojít k nerovnoměrnému sycení magnetického obvodu. Měření na Epsteinově rámu tento problém nemá, protože dle normy je nutné měřit minimální množství plechů, aby měření bylo reprodukovatelné. Za účelem ověření této úvahy bylo připraveno několik testovacích vzorků složených z různého počtu plechů, které byly následně navinuty a změřeny.

Tabulka 4.11 Geometrické rozměry a vstupní parametry pro magnetické měření

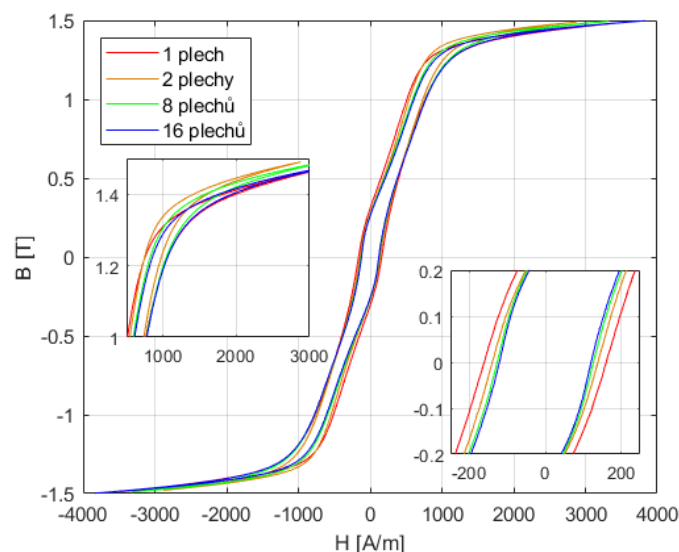
Páleno laserem M250-35A	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Vzorek 6	
Počet plechů	17	1	2	3	5	8	kusů
Vnější průměr vzorku	60	60	60	60	60	60	mm
Vnitřní průměr vzorku	48	48	48	48	48	48	mm
Výška vzorku	6	0,35	0,7	1,05	1,75	2,8	mm
Délka mag. obvodu	169,6	169,6	169,6	169,6	169,6	169,6	mm
Průřez	36	2,1	4,2	6,3	10,5	16,8	mm ²
Objem toroidu	6,11E-03	3,56E-04	7,13E-04	1,07E-03	1,78E-03	2,85E-03	m ³
Hmotnost	44	2,6	5,2	7,8	13,0	20,9	g
Primární vinutí	119	156	164	162	157	158	závitů
Sekundární vinutí	50	50	50	50	50	50	závitů

Jak lze zjistit z následujících grafů, tak měření pouze s jedním i dvěma plechy vykazovalo odchylku v řádech relativní permeability 50–100. Při použití 3 kusů plechů poskládaných na sebe už přestala být zmíněná odchylka výrazně viditelná.



Obr. 4.17 Závislost relativní permeability na velikosti magnetické indukce na 50 Hz

Odchylka různého počtu plechů se nejvýrazněji projevila na velikosti relativní permeability. Na velikosti magnetických ztrát nebo magnetizační křivce se projevila jenom minimálně. Ovšem i zde u celkových magnetických ztrát došlo k výraznému navýšení těchto ztrát ze 4 W/kg na 6 W/kg při sycení 1,5 T a navíc koleno magnetizační křivky u menšího počtu plechů bylo položené níže. Grafy s velikostí magnetických ztrát a magnetizační křivky lze nalézt v Příloze A – Obr. A. 14 a Obr. A. 15. Na tvaru hysterezní smyčky Obr. 4.18 se to projevilo její větší šířkou (zvětšenou hodnotou koercivity) a níže položeným kolenem při použití menšího množství plechů.

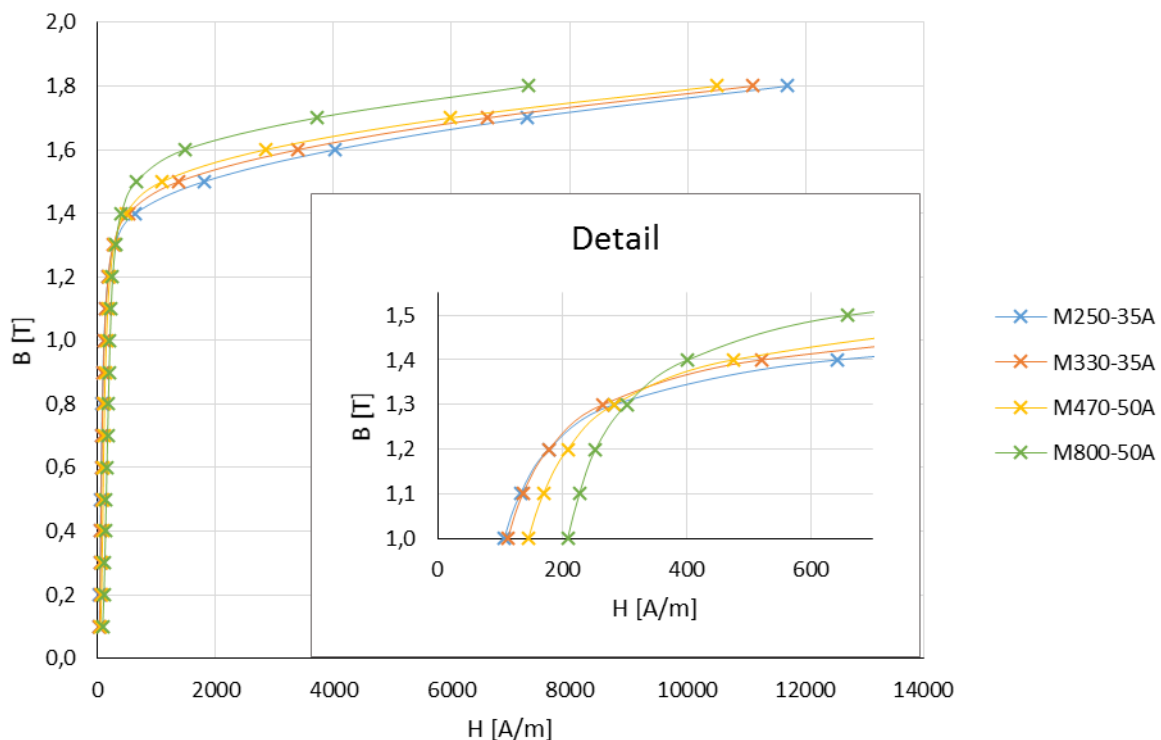


Obr. 4.18 Hysterezní křivky u toroidů s různým počtem plechů při 50 Hz

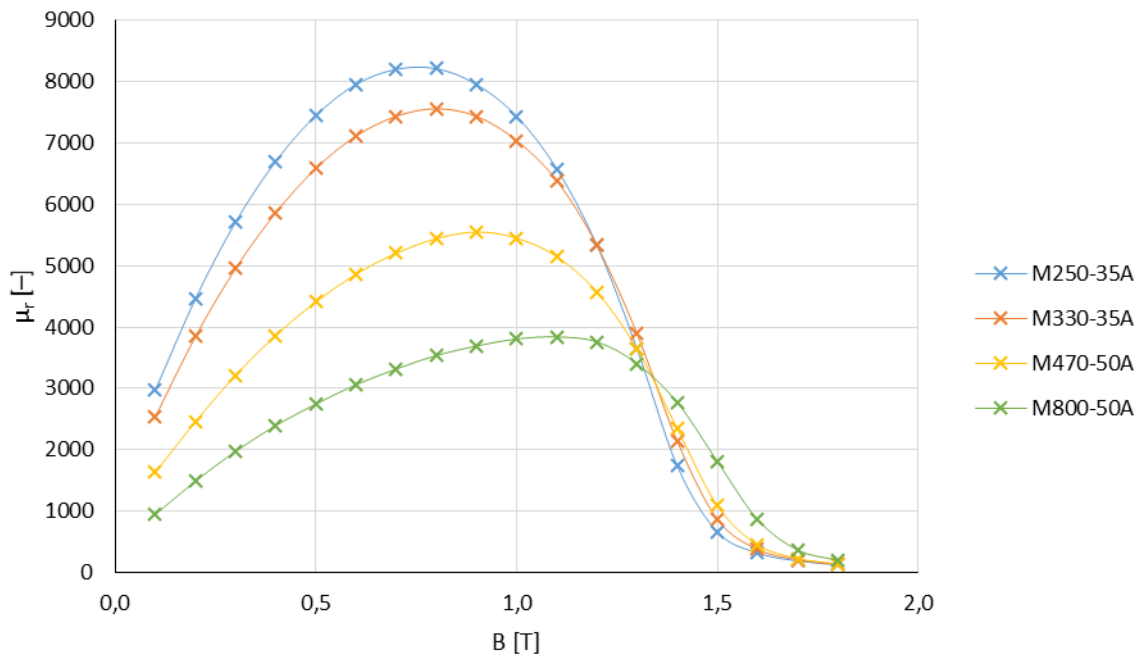
Při měření toroidních vzorků je nutné mít na paměti, že příliš malé množství plechů může zkreslovat výsledky a ideální je použít minimálně poloviční výšku vzorku k jeho šířce magnetického obvodu. Pro zaručení nejmenšího množství chyb je samozřejmě nejlepší používat čtvercový tvar průřezu magnetického obvodu.

4.2 Vliv způsobu výroby na magnetické vlastnosti

Dynamoplechy používané v elektrických strojích se dělí na orientované a neorientované. Orientované plechy se používají nejčastěji u transformátorů nebo v současné době i u statorů velkých točivých strojů. Vyznačují se nižšími magnetickými ztrátami a snadnou magnetizací ve směru válcování. Jedná se o materiál legovaný křemíkem, jehož množství se obvykle vyskytuje do 3 %. Přidání křemíku zvyšuje měrný elektrický odpor, ale také i křehkost a tvrdost materiálu [24]. Pro zlepšení obrobitelnosti těchto plechů výrobci používají speciální povlakové izolace plechů, které plechy na povrchu nejen elektricky izolují, ale také mohou usnadnit obrobitelnost daného materiálu. Válcování za studena v jednom směru zajišťuje obvykle anizotropii materiálu, kterou lze odstranit následným žiháním. Neorientované plechy lze využít u menších a středních točivých elektrických strojů. Tyto plechy nemají osu snadné a obtížné magnetizace, protože byla odstraněna žiháním nebo válcováním v různých směrech. Ke značení plechů se pro elektrotechniku se používá norma ČSN EN 10106 [61]. Dle této normy znamená značení plechu M470-50A následující informace. Písmeno M v názvu plechu značí použití pro elektrotechniku. Následující hodnota 3 čísel je stonásobek velikosti celkových magnetických ztrát, při frekvenci 50Hz a sycení 1,5T. Hodnota dvou čísel za pomlčkou je stonásobná velikost tloušťky plechu v milimetrech a písmeno A značí izotropní materiál [45]. Grafické závislosti magnetických vlastností několika nejčastěji používaných typů plechů lze nalézt na obrázcích níže.



Obr. 4.19 Srovnání magnetizačních křivek měřených výrobcem Sura při 50 Hz [44]



Obr. 4.20 Srovnání relativní permeability různých plechů na základě měření výrobce Sura Cogent při 50 Hz [44])

Jak je ze zobrazených průběhů patrné, tak dynamoplechvy nejvyšší jakosti M250-35A mají největší sklon magnetizační křivky i velikost relativní permeability. Jejich nevýhodou je, že po nasycení nedosahují takových hodnot magnetické indukce jako plechy s větší hodnotou magnetických ztrát. Volba vhodného typu materiálu je prvním krokem ke správnému návrhu elektrického stroje.

4.2.1 Srovnání měření jednoho materiálu na různých mezikružích

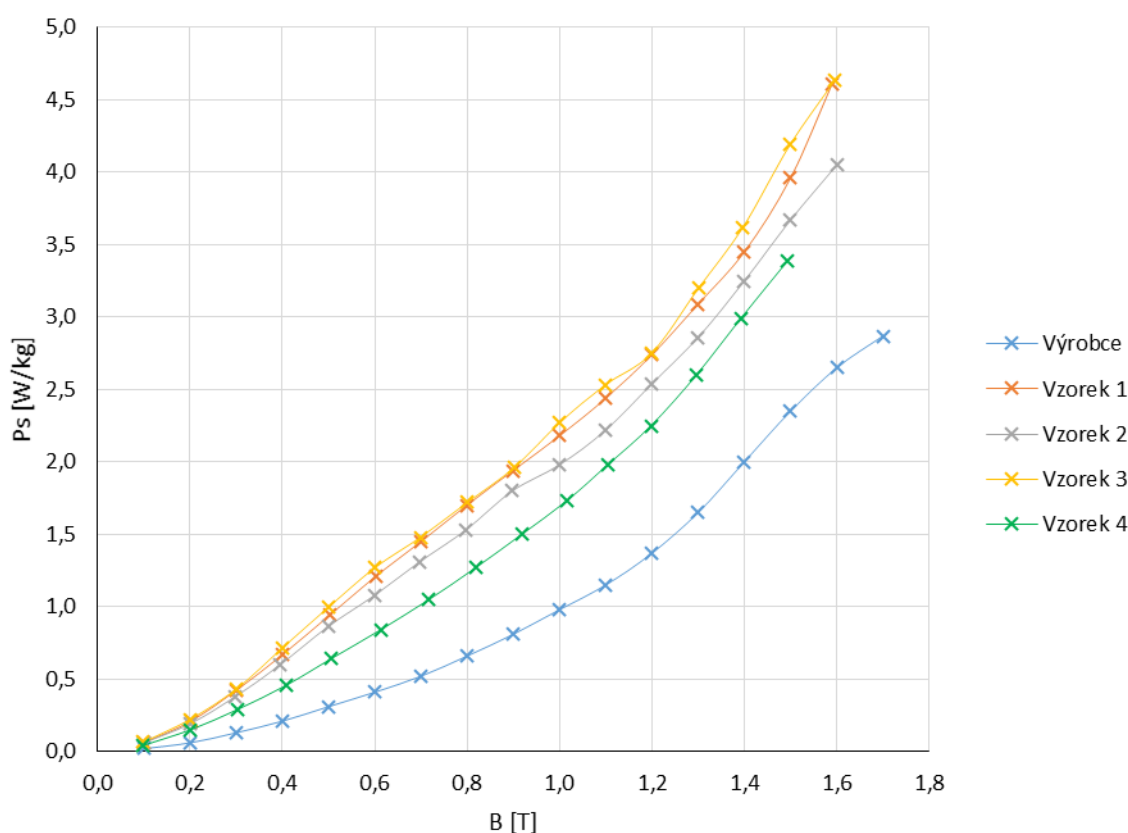
Jakmile je vybrán vhodný materiál, je žádoucí provést kontrolní měření jeho magnetických vlastností. Za určitých okolností je možné si vystačit s měřením na Epsteinově rámu, ale tuto metodu je vhodné u strojů pro speciální aplikace doplnit i měřením na toroidních vzorcích. Tyto vzorky dávají přesnější pohled do magnetických vlastností daného materiálu. Jejich výhodou je provádění měření na vzorcích s magnetickým obvodem o různém průřezu a s vyšší frekvencí. U těchto vzorků dochází k přiblížení řezných hran, které ovlivňují magnetické vlastnosti. Jak se projeví magnetické vlastnosti na různých mezikružích pro různé materiály lze vidět níže. Byly testovány materiály M250-35A, M330-35A a M470-50A. Poslední dva zmiňované materiály lze nalézt v Příloze B.

M250-35A je jeden z nejkvalitnějších materiálů, který obsahuje pro snížení hysterezních ztrát velká zrna. Vzorky na testovací měření byly připraveny laserem a jednotlivé plechy vyskládány na sebe do čtvercového průřezu. Naměřené průběhy jsou srovnávány 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.

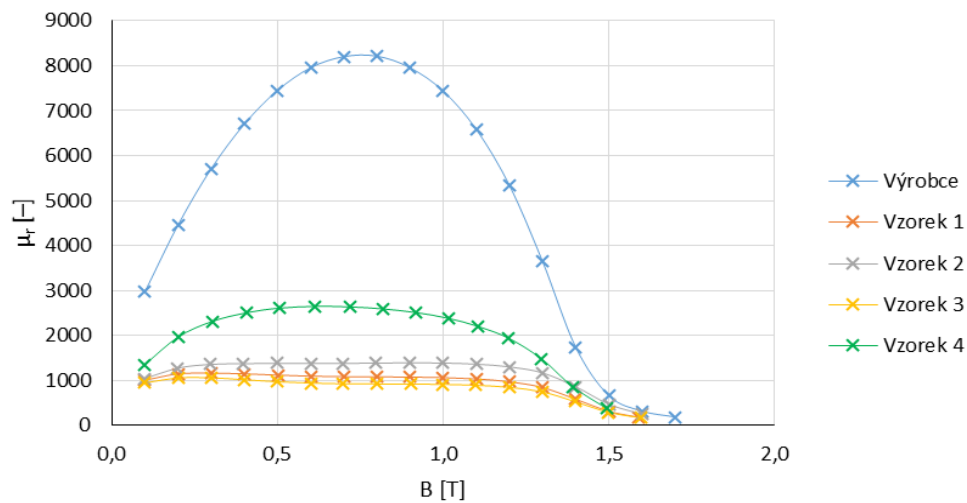
Tabulka 4.12 Parametry testovaných vzorků materiálu M250-35A

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
Průřez	36	57	26,5	226,5	mm ²
Hmotnost	44	149	44,95	543,38	g
Primární vinutí	119	243	230	345	závitů
Sekundární vinutí	30	50	50	40	závitů
Poměr průměrů	1,250	1,143	1,143	1,333	

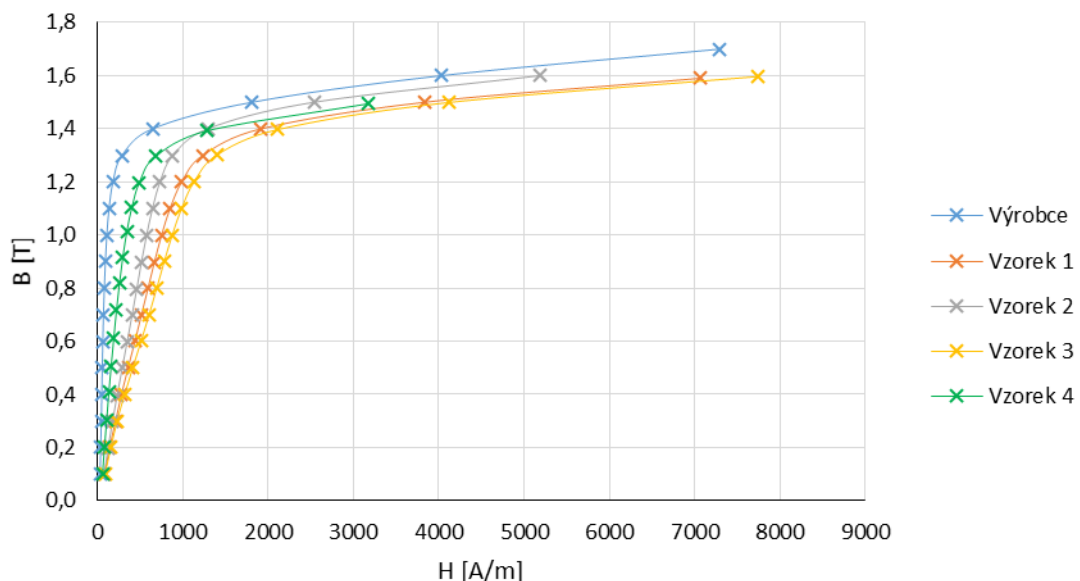
Jak lze poznat z Tabulka 4.12, tak materiál byl testován pro vzorky s různými geometrickými rozměry, lišila se velikost vnějších i vnitřních průměrů. U většiny vzorků byl dodržen optimální poměr průměrů s velikostí do 1,25, ale Vzorek 4 byl otestován i na mírně větší poměr průměrů 1,333. Zjištěné vlastnosti lze nalézt v grafech na Obr. 4.21, Obr. 4.22 a Obr. 4.23. Všechny průběhy jsou orientačně srovnány na budicí frekvenci 50 Hz a s daty poskytovanými výrobcem.



Obr. 4.21 M250-35A (magnetické ztráty) – srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno)



Obr. 4.22 M250-35A (relativní permeabilita) – srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno)

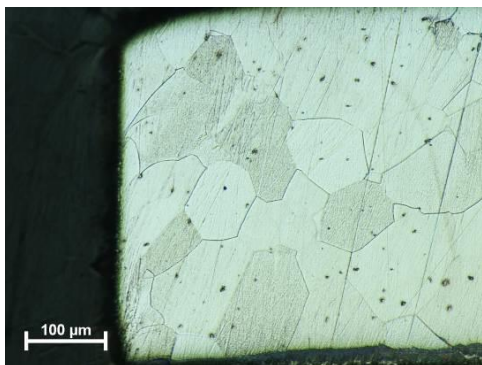


Obr. 4.23 M250-35A (magnetizace) – srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno)

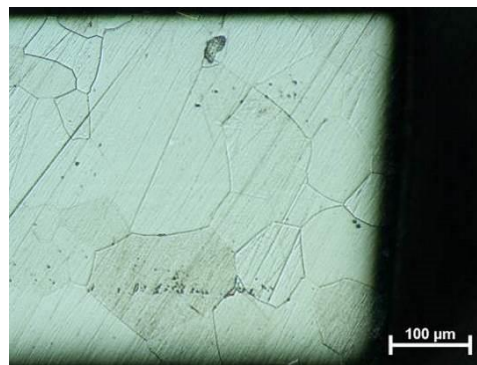
Jak je patrné z grafů uvedených výše, tak magnetické parametry materiálu poskytované výrobcem jsou vždy minimálně dvojnásobně lepší jak z měření na toroidních vzorcích. Je zde patrný vliv výroby, kdy výrobce používal metodu stříhu a větší šířku magnetického obvodu, zatímco toroidy byly připravovány řezáním laserem s užším magnetickým obvodem. Podrobněji budou vlivy výroby zkoumány v další kapitole. Při srovnání laserovaných vzorků mezi sebou je patrné, že magnetické vlastnosti materiálu byly tím horší, čím blíže byly řezné hrany k sobě. Pro Vzorek 3, který měl nejmenší šířku magnetického obvodu, byla nejvyšší velikost celkových magnetických ztrát, relativní permeabilita byla nejmenší, a i sklon magnetizační charakteristiky byl nejmenší z testovaných vzorků. Magneticky měkké materiály jsou velmi citlivé na jakýkoliv vnější vliv. Ke zjištění nejvhodnějších výsledků je ideální používat šířku magnetického obvodu dle šířky magnetického obvodu (např. zubu) v uvažovaném elektrickém stroji.

4.2.2 Magnetické vlastnosti materiálu po opracování různými metodami

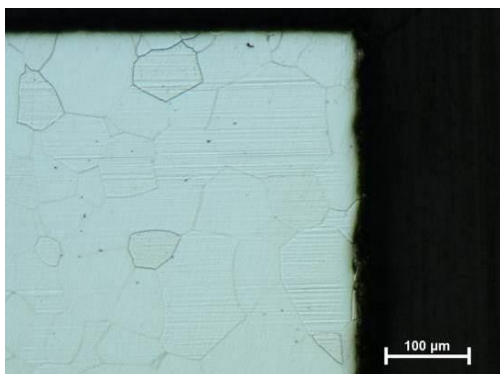
Jak již bylo nastíněno v předchozí kapitole, způsob výroby výrazně ovlivňuje magnetické vlastnosti magneticky měkkého materiálu. V této kapitole byly testovány dva druhy materiálů (M470-50A a M330-35A) na různé typy výroby. Vzorky byly připraveny laserovým řezáním, elektrojiskrovým řezáním, vodním paprskem a ražením na lisu. Geometrické rozměry a vstupní parametry lze nalézt v Příloze C. Testované vzorky po dané výrobě byly rozřezány, broušeny a leptány 2 % roztokem Nitalu, aby bylo možné zjistit velikost zrn, ze kterých byl materiál složen. Vyleptané vzorky byly zkoumány optickým mikroskopem (OM) i skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM). V obou případech byla u materiálů velikost zrn stejná. K mechanické deformaci zrn došlo pouze u ražení lisem a při řezání vodním paprskem v blízkosti řezné hrany. Laserové i elektrojiskrové řezání velikost zrn neovlivnilo žádným způsobem. U elektrojiskrového řezání docházelo kulpívání zbytků mědi vlivem odpařování od mosazného drátku používaném k řezání. To je založené na principu vzniku elektrického oblouku mezi drátkem a řezaným materiálem, který odpařuje převážně řezaný materiál a tím provádí řez. Množství odpařeného materiálu z řezaného drátku závisí na rychlosti řezání a kvalitě použitého materiálu. Laserové řezání se zdá vzhledem k výsledkům z optického mikroskopu jako nejvýhodnější varianta, protože nijak nedeformuje materiálová zrna ani neznečišťuje řezaný materiál nečistotami.



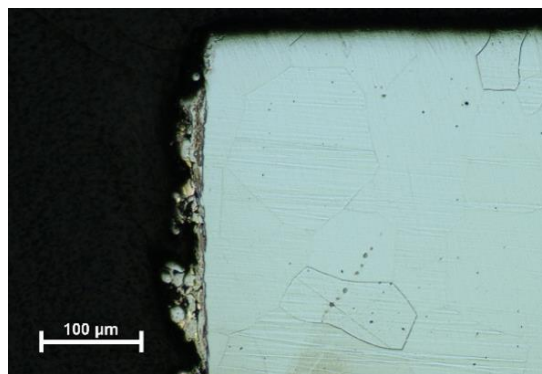
Obr. 4.24 OM plech, raženo, leptáno, 200x zvětšeno; M470-50A



Obr. 4.25 OM plech, laserové řezání, leptáno, 200x zvětšeno; M470-50A



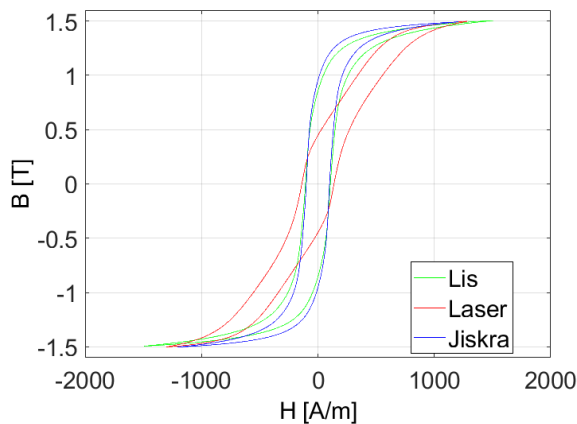
Obr. 4.26 OM plech, jiskrové řezání 1, leptáno, 200x zvětšeno; M470-50A



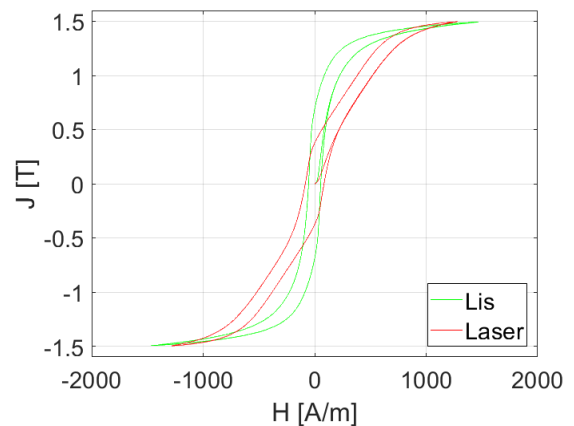
Obr. 4.27 OM plech, jiskrové řezání 2, leptáno, 200x zvětšeno; M470-50A

Elektrojiskrové řezání se obvykle využívá jako nejšetrnější způsob řezání, protože by mělo ovlivňovat díky chlazení testovaný materiál pouze minimálně. Ze zmíněných metod řezání je elektrojiskrové nejdelší, protože je materiál řezán (odstraňován) pouze odpařováním elektrickým

obloukem, který je okamžitě chlazen olejovou lázní, ve které je připravovaný vzorek umístěn. Elektrojiskrové řezání se obvykle používá pouze pro přípravu testovacích vzorků.

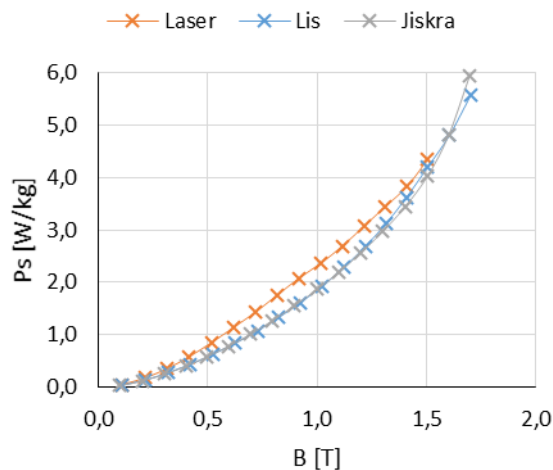


Obr. 4.28 Srovnání hysterezních křivek pro 50 Hz, 1,5T; M470-50A

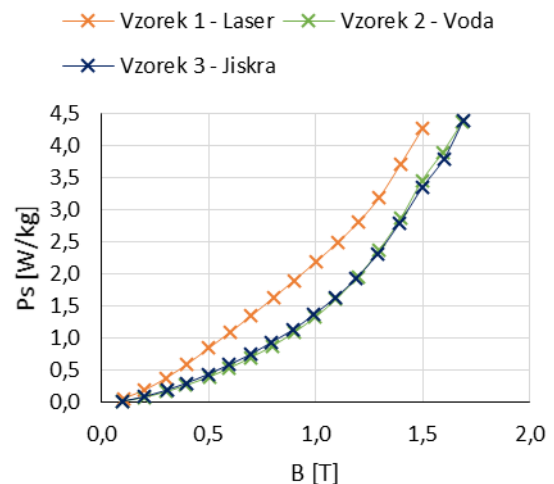


Obr. 4.29 Kvazistatická hysterezní křivka pro 1,5T; M470-50A

Srovnání výsledků měření při 50 Hz pro tři druhy výrob u materiálu M330-35A ukázalo, že hodnota relativní permeability pro nižší hodnoty magnetické indukce při řezání vodním paprskem je větší jak pro elektrojiskrové řezání.

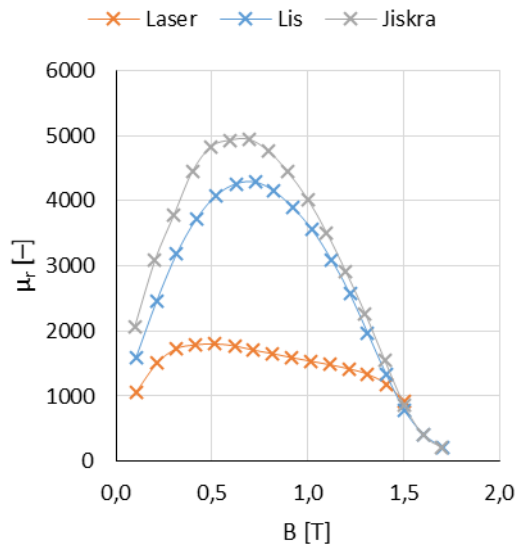


Obr. 4.30 Celkové magnetické ztráty při 50 Hz; M470-50A

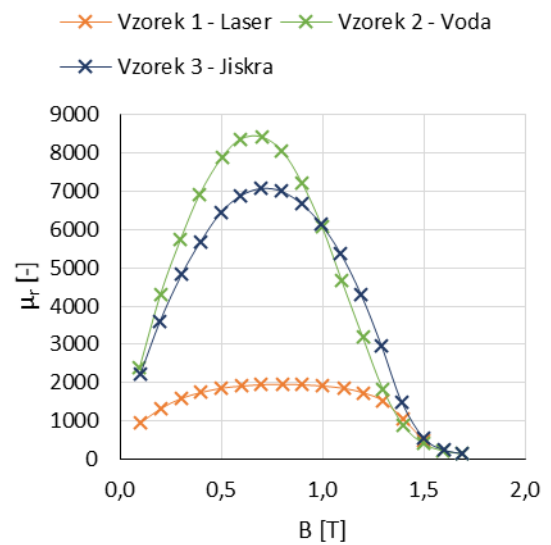


Obr. 4.31 Celkové magnetické ztráty při 50 Hz; M330-35A

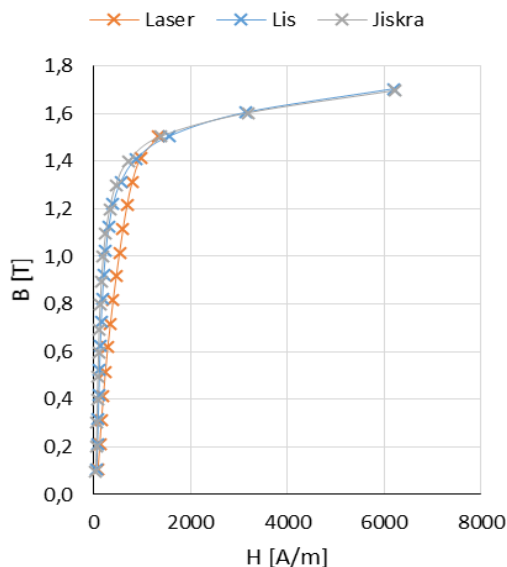
Tento výsledek je ovšem zkreslený, protože řezání vodním paprskem vytvořilo na řezné hraně, výrazné otřepy, které znesnadňovaly měření, a bylo nutné před vlastním měřením tyto hrany obrousit. Mechanické ovlivnění zrn i v tomto případě neprokázalo výraznější zhoršení magnetických vlastností a jako mnohem výraznější zdroj ovlivnění se jeví vnesené pnutí vlivem rychlé změny teploty po laserovém řezání. Tvary hysterezních křivek zůstaly stejné jak pro frekvenční měření, tak pro měření kvazistatické. I když se řezání vodním paprskem zdá dle magnetických měření jako nejvýhodnější, tak výrazné otřepy a následná oxidace řezné hrany vzorku s výraznými otřepy, zabráňují výraznějšímu rozšíření pro průmyslové aplikace.



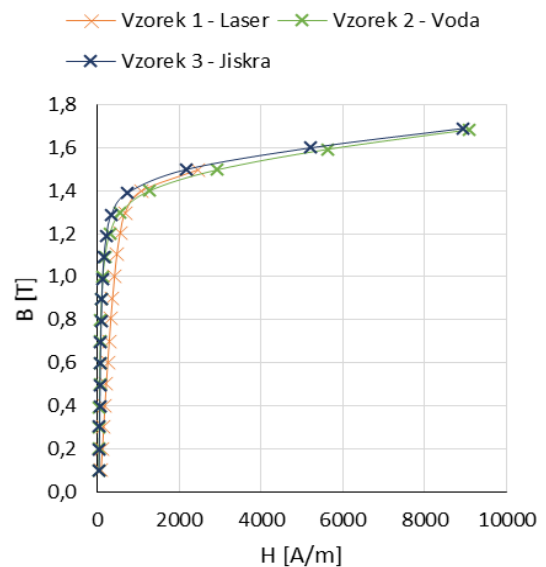
Obr. 4.32 Velikost relativní permeability při 50 Hz; M470-50A



Obr. 4.33 Velikost relativní permeability při 50 Hz; M330-35A

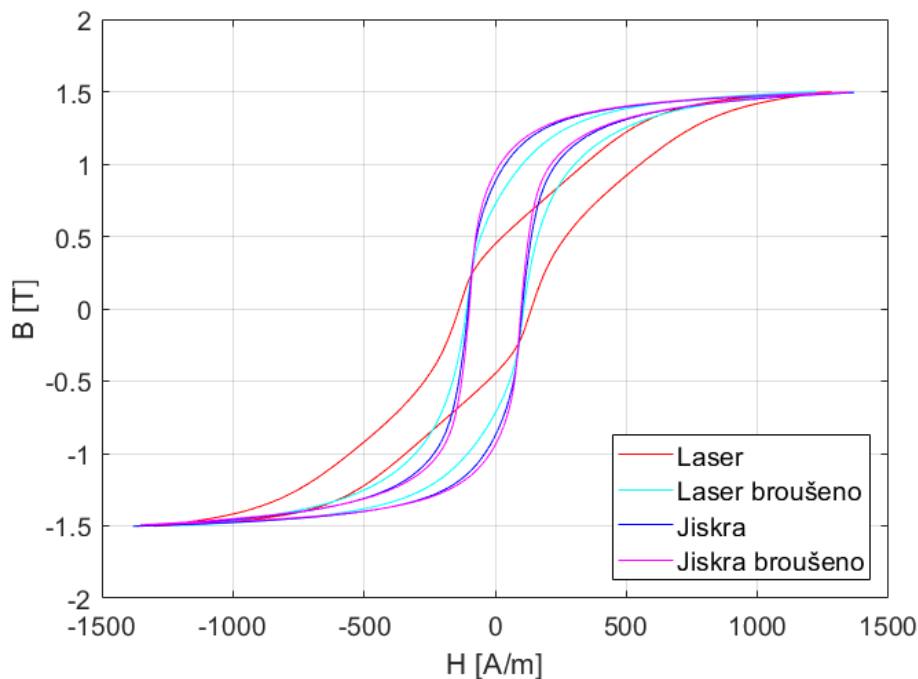


Obr. 4.34 Magnetizační křivky při 50 Hz; M470-50A



Obr. 4.35 Magnetizační křivky při 50 Hz; M330-35A

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 při menších hodnotách magnetické indukce u vzorků pálených laserem. 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.



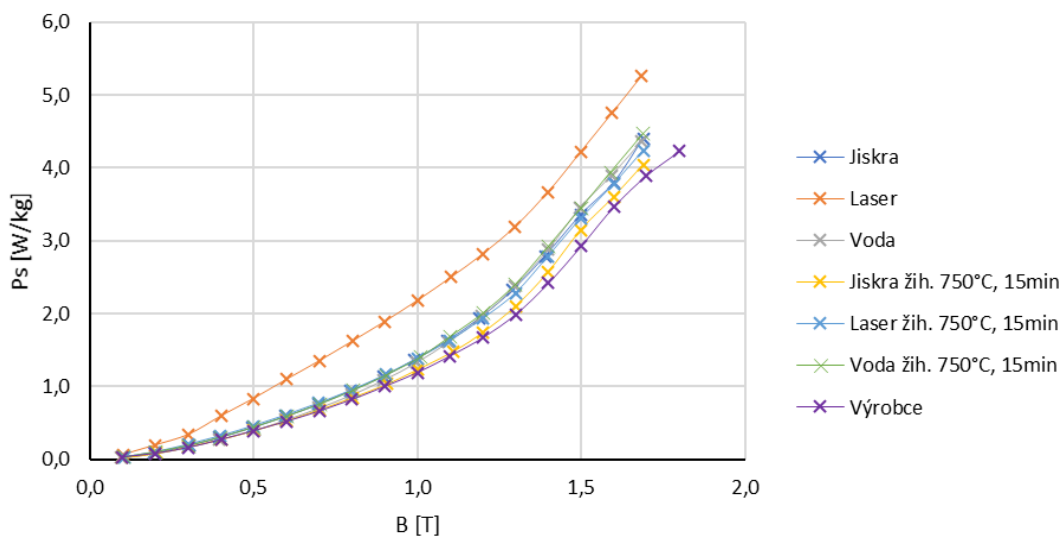
Obr. 4.36 Srovnání BH křivek vzorků po obroušení 50Hz, 1,5T; M470-50A

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 mössbauerovou spektroskopií, energetickou disperzní rentgenovou analýzou (EDX) a optickou emisní spektroskopií s doutnavým výbojem (GDOES) neodhalilo změnu složení materiálu. 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. 4.36. 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.

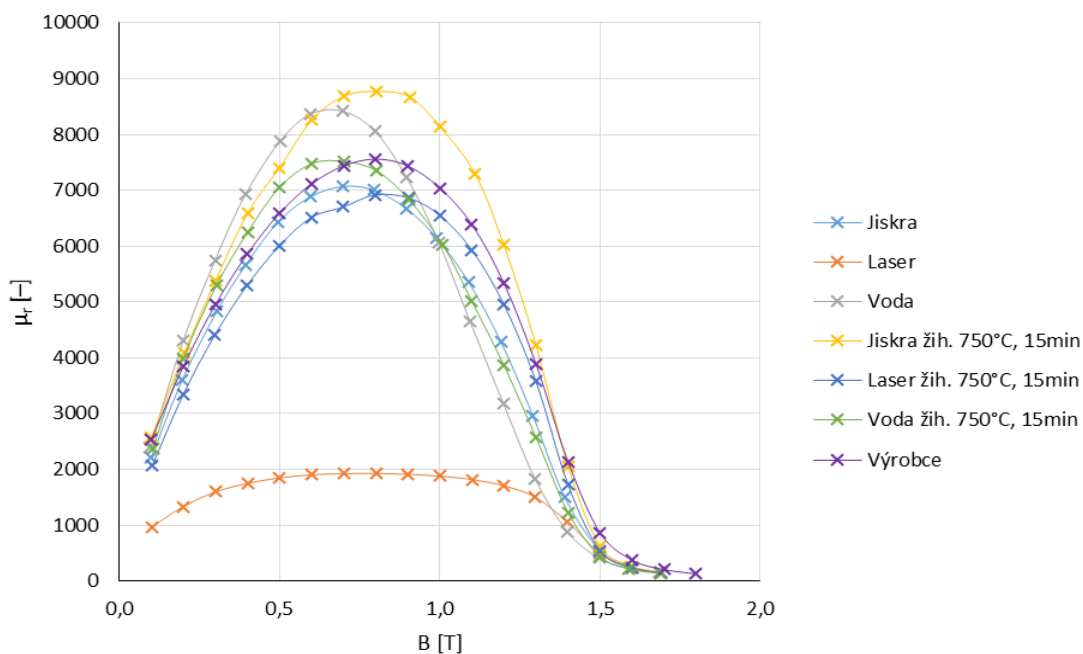
4.2.3 Různé způsoby výroby a vliv tepelného zpracování na magnetické vlastnosti materiálu

Jak bylo řečeno dříve a v literatuře [39–42], 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 přechkat 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 přechkat bez poškození. Na vzduchu izolace bez poškození přechká 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 [44, 45].

V rámci ověření vlivu žíhání na materiál dynamoplechů byl zvolen plech M330-35A. Vzorky byly připravené řezáním – laserem, vodou, elektrojiskrově a následně žíhány ve vakuu po různě dlouhou dobu při různé teplotě. Vstupní parametry a rozměry testovaných toroidních vzorků lze nalézt v Příloze D.

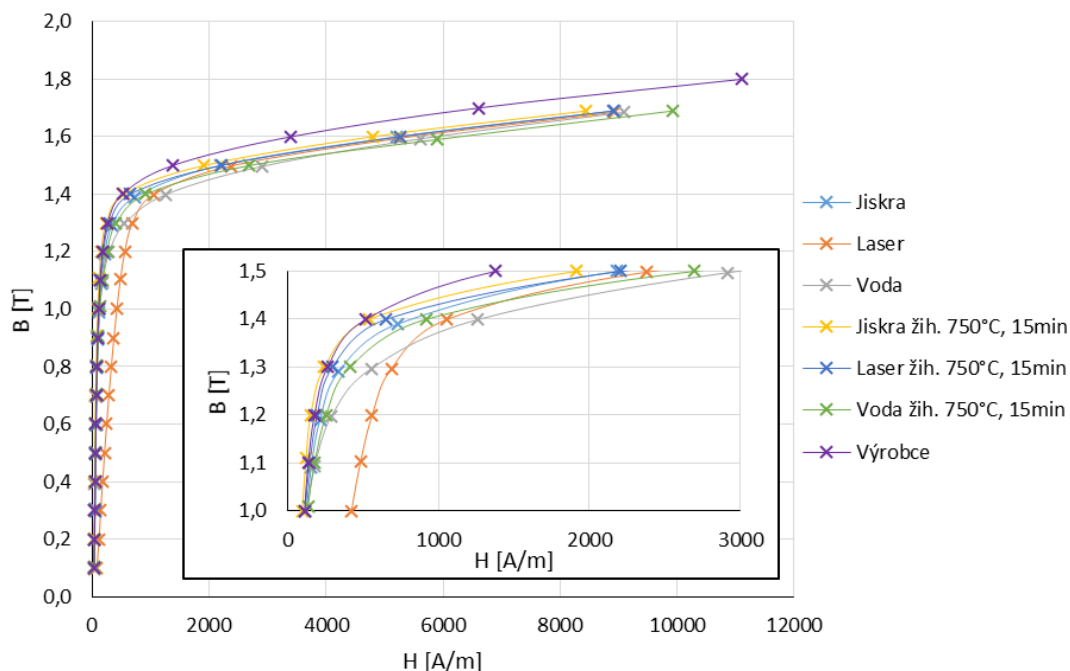


Obr. 4.37 M330-35A – Celkové magnetické ztráty při 50 Hz



Obr. 4.38 M330-35A – Velikost relativní permeability při 50 Hz

Z testovaných vzorků jdou největší změny vidět na laserovaném vzorku, protože zbylé dvě metody přípravy patří k šetrným způsobům přípravy, jak již bylo dříve zmíněno.



Obr. 4.39 M330-35A – Magnetizační křivky při 50 Hz + detail

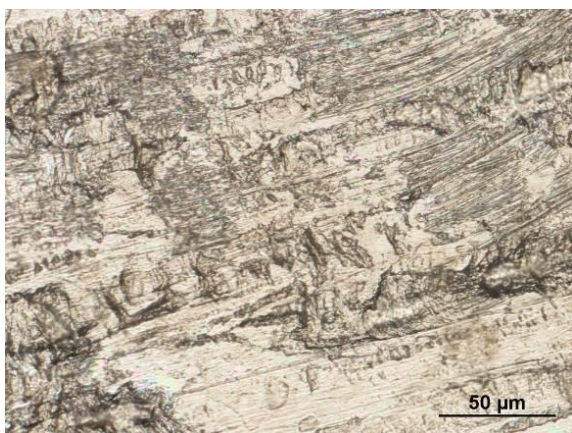
Výsledky dalších měření při odlišných teplotách lze nalézt opět v Příloze D. Uvažované časy pro teplotu 650 °C byly 30, 60 a 120 minut a pro teplotu 750 °C, časy 5, 10 a 15 min. Největšího zlepšení dosáhl materiál po žihání na teplotě 750 °C v délce 15 minut, ale i pro žihání při teplotě 650 °C v délce 30 min bylo pozorovatelné zlepšení magnetických vlastností. Po vyžhání materiálu se měřené hodnoty magnetické indukce a ztrát přiblížily k hodnotám uvedených výrobcem, získanými na Epsteinově rámu. Na základě zjištěných informací lze tvrdit, že žihání 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. Měření na těchto testovaných vzorcích mohlo být zatíženo chybou vlivem použití žihaných plechů s poškozenou izolací. Společnost, která prováděla žihání v ochranné atmosféře, nechala materiál chladnout v normální atmosféře a došlo k mírnému poškození původní izolace. V místě každého poškození došlo k oxidaci materiálu (zreznutí), které sice svým způsobem představuje také způsob jednoduché izolace, ale při testovacím měření se toto poškození výrazně neprojevilo.

4.2.4 Poškození izolace vlivem teploty

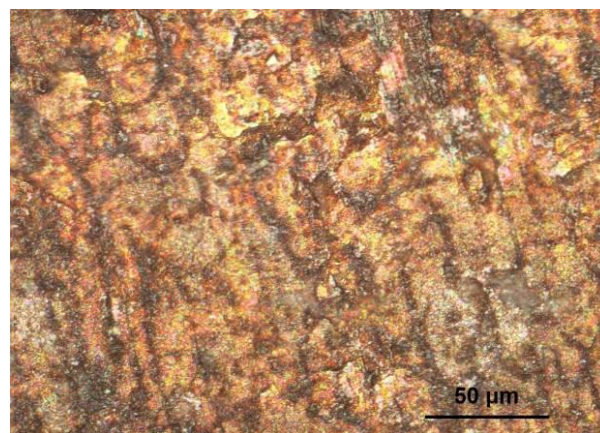
Neorientované křemíkové plechy jsou nezbytné pro konstrukci elektrických strojů [17]. Každý plech z této oceli určené pro elektrické stroje je potažen tenkou vrstvou elektrické izolace. Tato povrchová vrstva minimalizuje ztráty způsobené vířivými proudy. Vlivem poškození těchto povlaků se mohou vířivé proudy uzavřít mezi sousedními plechy a ohřát vlivem vířivých ztrát celý svazek a změnit magnetické vlastnosti plechu [46, 47, 49]. 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 žihání na testované parametry prospěšné, protože dochází k relaxaci materiálu a uvolnění napětí nashromážděného vlivem výroby [2]. Ovšem povrchová vrstva má omezenou tepelnou stabilitu pro různé druhy okolních atmosfér. Vlivem překročení mezní teploty bez ochranné atmosféry může dojít k degradaci změny barvy a snížení ochranné funkce izolace [45].

Testované vzorky byly z komerčně prodávaného izolovaného křemíkového neorientovaného plechu. Izolační vrstva byla C-5 s odolností na vzduchu 180 °C a v ochranné atmosféře 850 °C [45]. Tento povlak obsahuje jak organické, tak anorganické složky a plnidla pro zvýšení povrchového odporu. Udávaná tloušťka bezbarvé izolace je dle výrobce 0,5 – 3 μm. Mezi hlavní vlastnosti izolace patří velikost povrchového odporu, odolnost proti ražení a odolnost proti korozi. Mezi druhořadé vlastnosti patří tepelný odpor, plnicí faktor železa ve svazku elektrického stroje a odolnost proti poškrábání. Podrobnější informace o dalších typech izolací lze nalézt v Příloze E. Testované toroidní vzorky byly připraveny ve dvou verzích průměrů laserem (větší mezikruží) a elektrojiskrovým řezáním. Žihání bylo provedeno bez ochranné atmosféry po dobu 5 hodin na 500 °C. Původním cílem tohoto tepelného zpracování pro výrobce motorů bylo odstranění zinkových tyčí (teplota tání přibližně 420 °C) z již zkompleťovaného stroje, aby mohla být provedena jeho oprava. Zadáním bylo ověřit a zjistit velikost poškození izolace dynamoplechů po tepelném zpracování. Během žihání došlo dle očekávání vlivem oxidace ke zhnědnutí povrchové izolace. Testovací vzorky ve tvaru toroidů byly připraveny ze stejného materiálu, stejným způsobem výroby i stejným tepelným zpracováním, aby bylo možné rekonstruovat okolní podmínky v opravovaném elektrickém stroji. Toroidy byly složeny z jednotlivých mezikruží a následně staženy k sobě izolační páskou. K měření kvality povrchové izolace obvykle slouží Franklinův tester, ale ten nebyl pro toto měření k dispozici, takže byla zvolena náhradní metoda v podobě zjišťování velikosti vířivých ztrát pomocí magnetického měření.

Bylo připraveno několik variant testovaných vzorků, které byly označeny různými indexy. Menší testované toroidy jsou označeny indexem 1 a větší indexem 2. Žihání vzorku je označeno indexem *a*. Pro srovnání byly i u menšího vzorku plechy následně nanesené izolace mechanicky obroušeny a změřeny jejich vlastnosti. Tato úprava je označena indexem *d*. Větší vzorky byly přeměřeny i pro verzi pouze jednoho plechu, index 2.1. Informace o struktuře povrchu testovaných vzorků byly získány optickým mikroskopem, kde je nejvýraznější změnou zhnědnutí povrchové izolace.

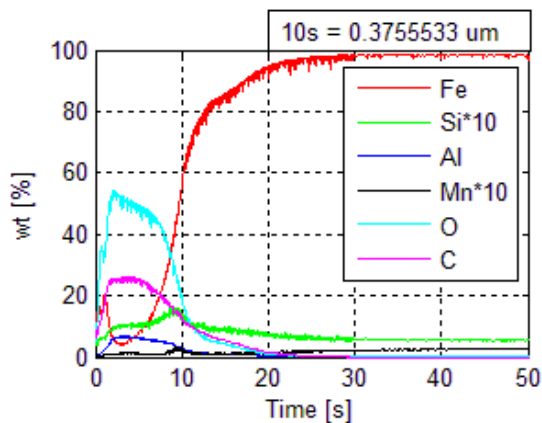


Obr. 4.40 OM 500x zvětšení, Vzorek 1

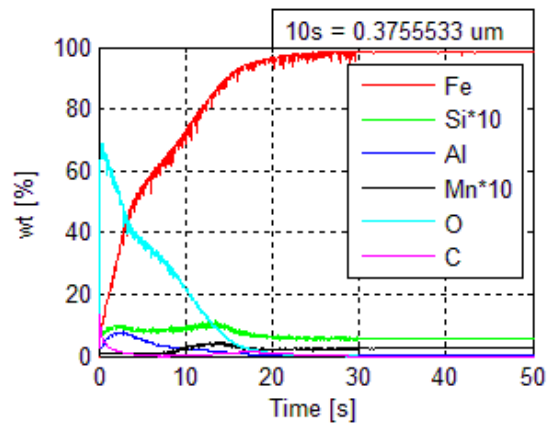


Obr. 4.41 OM 500x zvětšení, Vzorek 1a

Izolační vrstva je velmi tenká a výsledky na Optickém emisním spektroskopu s doutnavým výbojem (Glow-discharge optical emission spectroscopy – GDOES) to potvrzují. V povrchové vrstvě došlo vlivem žihání bez ochranné atmosféry k oxidaci a změně složení izolace. Nejvýrazněji se zde projeví oxidy železa a následně změna procentuální velikosti uhlíku a křemíku v povrchové vrstvě.

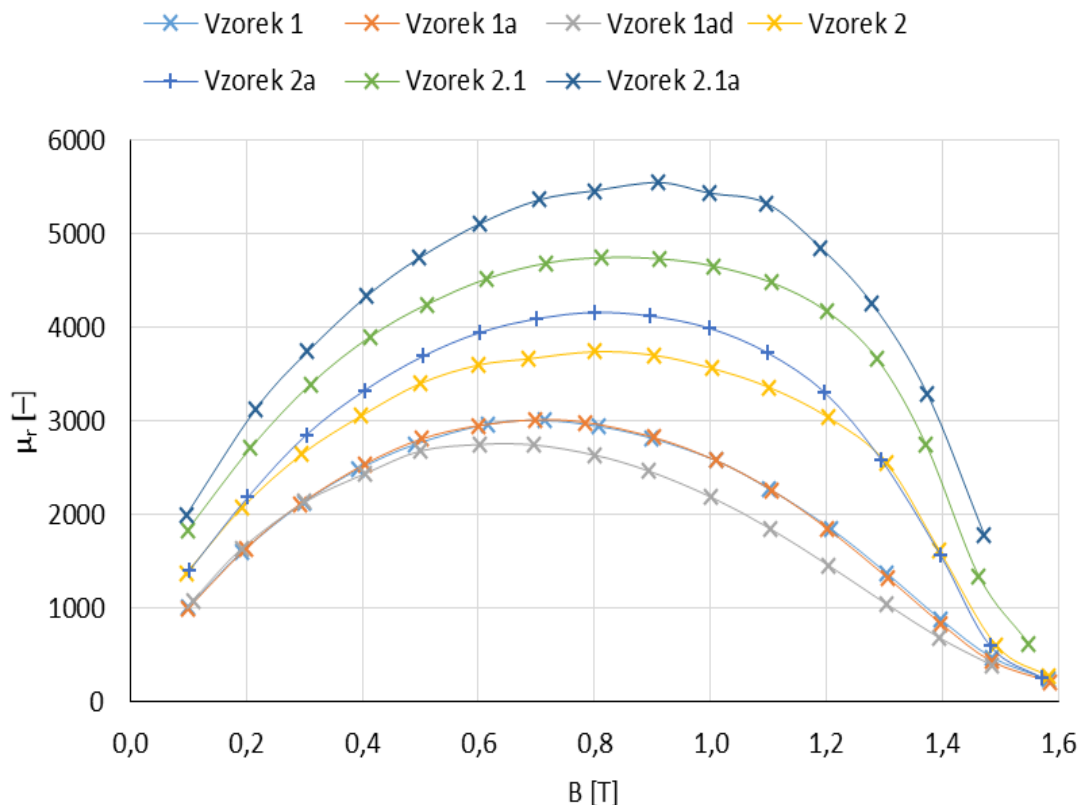


Obr. 4.42 GDOES vzorek 1

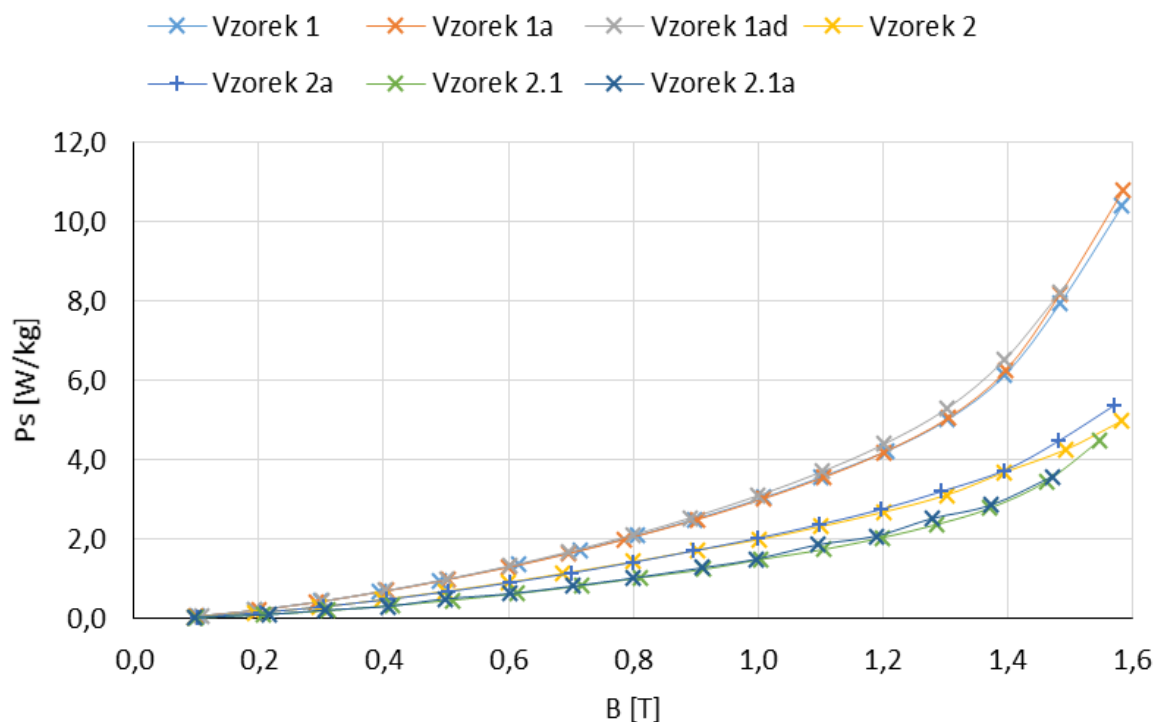


Obr. 4.43 GDOES vzorek 1a

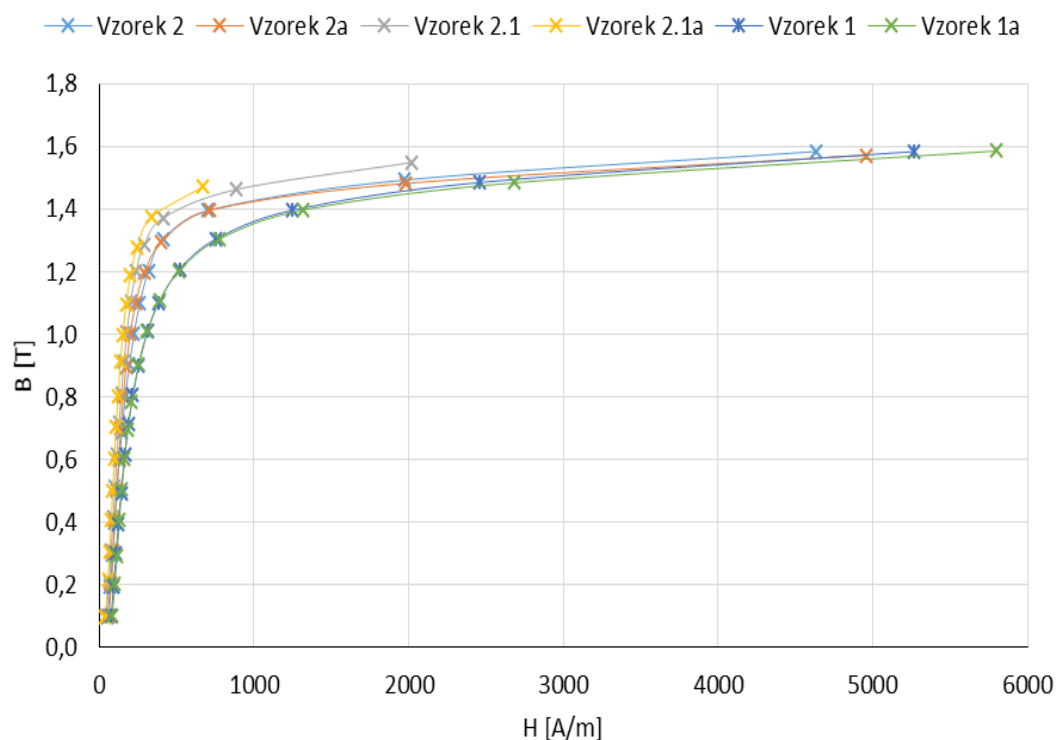
Z magnetických výsledků se jako nejlepší jeví porovnání frekvenčního měření pro různé vzorky (žíhané a nežíhané při různých velikostech) a kvazistatického měření, které lze nalézt v Příloze E. Vlivem zhoršené izolace je předpoklad, že by se měly u střídavého měření projevovat větší ztráty způsobené vířivými proudy. Vlastní měření sice neumožňuje oddělit velikost vířivých ztrát od změřených celkových magnetických ztrát, ale při porovnání stejného vzorku před a po vyžhání je možné zjistit nárůst celkových magnetických ztrát a šířky hysterezní křivky vlivem vířivých proudů. Na následujících grafech je možné vidět porovnání několika velikostí vzorků před a po žhání. Je zde porovnávána velikost relativní permeability, magnetických ztrát a magnetizační charakteristika těchto vzorků.



Obr. 4.44 Relativní permeabilita při 50 Hz pro malé a velké vzorky



Obr. 4.45 Ztráty pro malé i velké vzorky při 50 Hz



Obr. 4.46 Komutační křivky pro malé i velké vzorky při 50 Hz

Na Obr. 4.44 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 vyžihání u každého vzorku vzrostla. Po vyžihání došlo k uvolnění indukovaného pnutí uvnitř plechu a zlepšení magnetických vlastností. Na Obr. 4.45 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 projevily až od větší saturace vzorku (cca 1 T) při 50 Hz, ale stále navýšení nebylo příliš výrazné. Koleno magnetizační charakteristiky na Obr. 4.46 bylo pro větší vzorky položeno níže, ale celková hodnota magnetické indukce po nasycení magnetického obvodu byla mezi vzorky téměř stejná.

V rámci ověření přesnosti měření bylo provedeno kontrolní měření s mechanickým odstraněním izolace na menším vzorku a klasickém větším z dřívějších měření. Zvolený vzorek byl původně z materiálu M470-50A po ražení na lisu bez dalších úprav změřen. V druhém kroku byl vzorek rozebrán a otřepy na hranách mezikruží byly odstraněny speciálním nožem na odstraňování otřepů a opět přeměřen. Nakonec byl vzorek ještě jednou rozložen, laková izolace byla mechanicky obroušena u všech plechů z obou stran a znovu proměřen. Toroidní vzorky byly pokaždé poskládány z mezikruží jednotlivých plechů, která byla stažena k sobě elektrikařskou páskou. Výsledky tohoto měření lze nalézt v Příloze E. Měření potvrdilo mírný nárůst celkových magnetických ztrát při měření na frekvenci 50 Hz a snížení velikosti relativní permeability při magnetické indukci 0,6 T. Kontrolní měření na větším testovacím vzorku bez žihání potvrdilo výsledky z měření na mnohem menších žíhaných vzorcích, které byly kromě žihání také obroušeny. S klesající hodnotou povrchového odporu, vlivem žihání nebo odstraněním izolace, dochází k poklesu hodnot relativní permeability a nárůstu magnetických ztrát při vyšším sycení.

Získané výsledky indikují, že izolační povlak C-5 je sice po žihání při teplotě 500 °C/5hodin /bez ochranné atmosféry poškozený, ale nedojde k jeho úplnému zničení, ale pouze zhnědnutí. Funkci izolace představuje i vrstvička oxidů železa, která vzniká v místě poškození izolačního povlaku. Žihání 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 vyžihány. Větší stlačení plechů povede pravděpodobně k větším ztrátám. Poškozená izolace může přestat plnit svou funkci a pozitivní účinek žihání může být vyrušen většími vířivými proudy vlivem zkratování použitých plechů.

4.3 Měření plného materiálu

V případě konstrukce vysokootáčkových elektrických strojů nastává obvykle situace, kdy je na magnetický obvod rotoru výhodnější použít plný materiál místo plechů. Využití plného materiálu má výhodu ve větší mechanické pevnosti, která je velmi žádaným parametrem u těchto rotorů, protože se zde vyskytují velmi vysoké odstředivé síly a je zde i riziko prohnutí. Zatímco mechanické vlastnosti daného materiálu lze nalézt běžně v katalogu výrobce, tak magnetické vlastnosti obvykle u plného materiálu chybí. Navíc u takového materiálu není možné použít standardizované měření na Epsteinově rámu. K měření vlastností plného materiálu se nejvíce hodí měření na toroidních vzorcích, protože se jedná o uzavřený vzorek a lze na něm provádět i frekvenční měření.

4.3.1 Srovnání různých tloušťek mezikruží

Samotné měření toroidního vzorku vyrobeného z plného materiálu má svá specifika. Je nutné zvolit adekvátní 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. Měření magnetických vlastností by se mělo, jak již bylo zmíněno provádět za pokojové teploty do 25 °C, a proto při vyšších teplotách je nutné počkat, až testovaný vzorek vychladne. Se vzrůstající teplotou se mění i rezistivita materiálu a odolnost vůči těmto proudům, což mění výsledné změřené magnetických vlastností za tepla a za studena. Při použití materiálu v rotoru vysokootáčkových strojů se obvykle předpokládá větší hodnota ztrát, které se musí odvést speciálním chlazením. Provozní teplota materiálu rotoru je poté mnohem vyšší, než při jaké je prováděno měření a změřené hodnoty magnetických vlastností tedy úplně neodpovídají. Vzhledem k vyšší teplotě a vzrůstající rezistivitě dojde k potlačování vířivých ztrát, a tak výsledná hodnota magnetických ztrát je při ohřátí materiálu menší. Řešením pro přesnější výsledky by mohlo být provádění měření při zvýšené teplotě materiálu, ale zde se zase objevuje úskalí v tepelné odolnosti použité PVC izolace umístěné na primárním vinutí testovaného vzorku. Vyšší proudy potřebné k vybuzení magnetického pole způsobují ohřev primárního vodiče, který vede k následnému průrazu a roztavení PVC izolace v ohybech primárního vinutí. Tím dojde obvykle ke zkratování primárního vinutí na kostru měřeného materiálu a další měření není již bez převinutí možné. K roztavení PVC izolace dochází v ohybech již při průměrné teplotě vinutí 60 °C. V ohybech jednotlivých závitů dochází ke generování mnohem větší teploty.

Hlavním úskalím při měření magnetických vlastností plného materiálu je volba vhodných geometrických rozměrů. Tyto rozměry mají určitá pravidla na poměr průměrů, velikost průřezu apod. Z praktického hlediska je nevýhodné mít příliš velký vnější průměr proti vnitřnímu průměru, protože budící vinutí z vnitřní strany bude symetrické, závit vedle závitu, ale z vnější strany bude umístěné s příliš velkými mezerami. Magnetický obvod by byl následně kolem vnitřního průměru velmi přesycený. Aby byla tato teorie ověřena, byl vybrán materiál 42CrMo4, ze kterého byly připraveny toroidy s různými geometrickými rozměry. V jedné variantě, kdy je vzorek označen V1, byl materiál vyválcován z původní výšky válce 2 mm na 1,6 mm. Z takto vyválcovaného materiálu byl připraven toroid, u kterého byly zjištěny magnetické vlastnosti. Po změření byl toroid vyžíhán ve vakuu po dobu 1 hodiny při 500 °C a následně opět proměřen na magnetické vlastnosti, které se po vyžíhání opět obnovily. Podrobnější popis geometrických rozměrů testovaných vzorků lze nalézt v obdobných, ale rozsáhlejších tabulkách v Příloze F.

Tabulka 4.13 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	

Jak lze vidět v Tabulka 4.13, poměr průměrů se u testovaných vzorků zvětšuje s cílem ověřit, jak se budou lišit výsledky měření ze vzorků s poměrem průměrů větším než 1,1. Dále byl

testován vliv tloušťky toroidního vzorku na výsledná data. Vnější průměr 55 mm byl využíván jako výchozí, aby se omezil vliv výroby na tuto stranu toroidu, protože výrobcem dodaný válec měl průměr 60 mm. Jeho povrch nebyl příliš hladký, a proto ho bylo nutné osoustružit. Menší průměry než cca 55 mm byly použity pro srovnání s dalším materiálem 41CrMo4, který byl dostupný pouze v menší variantě válce. A nejmenší průměr byl zvolen dle velikosti žíhací pece, kde byl vzorek žíhán. Adekvátní představu o velikosti testovaných vzorků je možné získat na základě hmotnosti jednotlivých toroidů.

Během měření bylo nutné sledovat teplotu měřených vzorků z důvodu jejich výrazného ohřevu, ke kterému docházelo i při kvazistatickém měření. V některých případech došlo k chybě programu a zaseknutí napájení v maximální nastavované magnetické indukci, tak se vzorek velmi rychle ohříval. Teplota vzorku byla měřena multimetrem Agilent U1252B, který byl vybavený termočlánkem. Zdrojem ohřevu v tomto případě bylo vinutí, kterým tekla sice stejnosměrný proud, ale vysoké hodnoty, což způsobilo Jouleovy ztráty ve vodiči a následný ohřev testovaného vzorku.

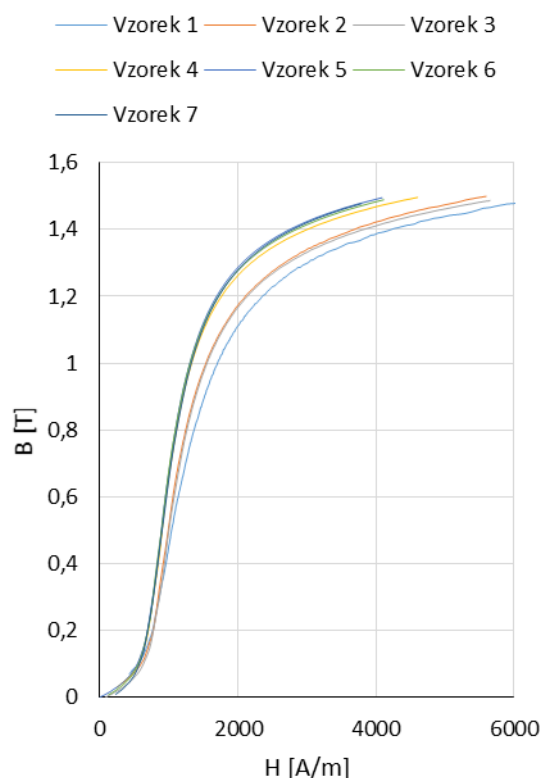
U vzorku 7 navíc došlo k problémům s vybuzením magnetické indukce na stejnou hodnotu jako u ostatních vzorků. Primární budicí vinutí na tomto vzorku bylo nedostatečné z vnější strany a zdroj nebyl schopen dodat dostatečně velkou hodnotu proudu a napětí. Problém byl částečně vyřešen navinutím dalších závitů, které ovšem z vnitřní strany toroidu byly ve dvou vrstvách, což znamenalo, že část vinutí byla ve větší vzdálenosti od magnetického obvodu jak zbytek vinutí. Další vrstva z vnitřní strany již nebyla navíjena, protože by došlo k ještě většímu zkreslení magnetických parametrů a zvýšenému ohřevu testovaného vzorku z vnitřní strany díky několika vrstvám vinutím. Vinutí na vnější straně bylo i po navinutí druhé vrstvy na vnitřní straně stále jednovrstvé a stále bylo řídce rozmístěné na vnější straně toroidu pro vytvoření homogenního magnetického pole v materiálu.

Tabulka 4.14 Výsledky kvazistatického měření na materiálu 42CrMo4

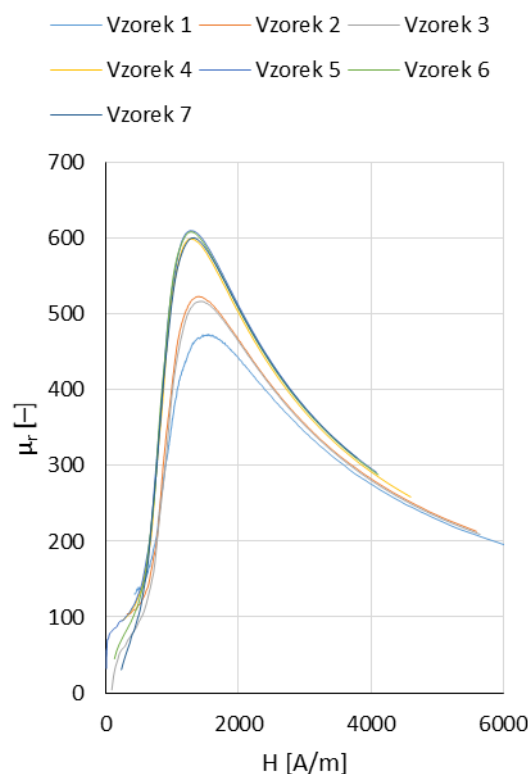
Vzorek	1	4	5	7	2	3	V1	V1 a	
B_{max}	1,513	1,503	1,501	1,483	1,507	1,495	1,499	1,53	T
B_r	1,18	1,3	1,31	1,31	1,24	1,24	1,04	1,24	T
H_c	965	891	885	902	928	947	1321	1057	A/m
μ_{max}	474	601	611	602	523	518	340	587	
H_{max}	6866	4602	4088	3790	5595	5650	5501	5061	A/m

Stručné výsledky měření lze vidět v Tabulka 4.14, 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 v ose toroidního prstence. Hysterezní křivka má nižší koleno magnetizace a je širší, má větší koercivitu. 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.

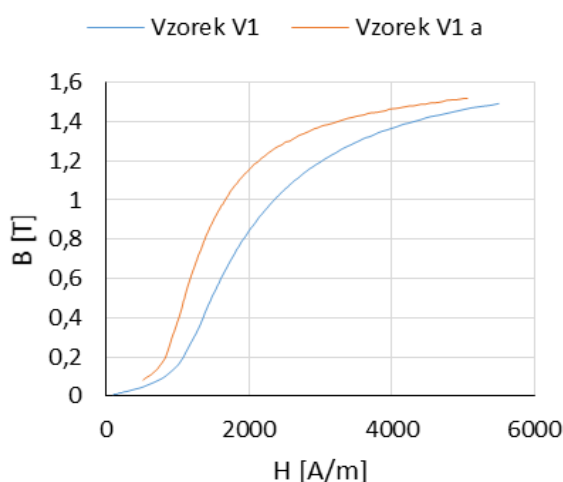
Maximální intenzita magnetického pole byla pro oba vzorky prakticky stejná. U válcovaného vzorku V1 je patrné, že válcováním se zvýší intenzita magnetického pole i koercivita. Naopak klesne relativní permeabilita a remanentní indukce. Po vyžhání dojde k opětovnému zvýšení relativní permeability s remanentní indukcí a snížení intenzity magnetického pole s koercivitou. Celé průběhy kvazistatických měření lze nalézt pro Vzorky 1-7 na Obr. 4.47, Obr. 4.48 a pro válcované vzorky na Obr. 4.49, Obr. 4.50.



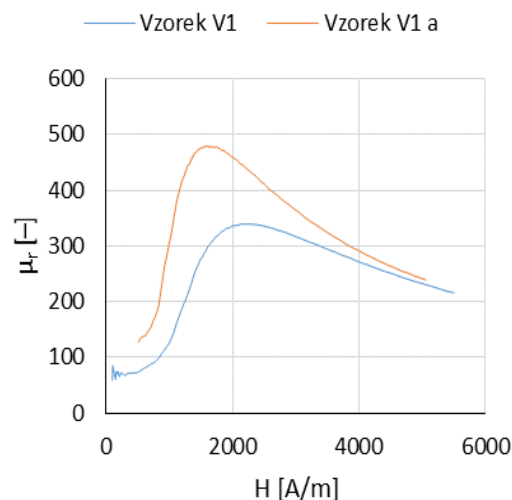
Obr. 4.47 Magnetizační křivky při kvazistatickém měření; materiál 42CrMo4



Obr. 4.48 Relativní permeabilita při kvazistatickém měření v závislosti na H ; materiál 42CrMo4



Obr. 4.49 Magnetizační křivky při kvazistatickém měření Vzorek V1 válcován a

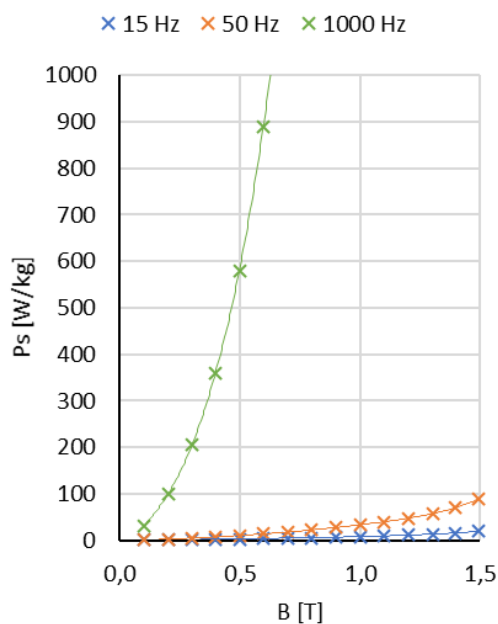


Obr. 4.50 Relativní permeabilita při kvazistatickém měření v závislosti na H ; materiál 42CrMo4

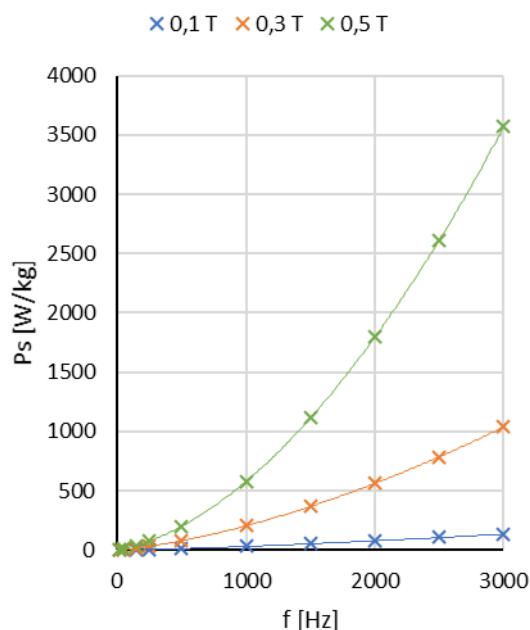
následně žihán; materiál 42CrMo4

Kromě kvazistatického měření bylo realizováno i měření na několika frekvencích (20 Hz až do 3000 Hz). Hodnota nízké frekvence byla zvolena z důvodu blízkosti k pracovní frekvenci používané u vysokootáčkových asynchronních motorů. Se vzrůstající frekvencí měřené ztráty dle očekávání díky vířivým proudům narůstaly. Naměřená data poskytla představu, v jakých hodnotách se budou pohybovat celkové magnetické ztráty v tomto materiálu. Všechny frekvence nebylo ovšem možné změřit do stejně vysoké magnetické indukce díky limitům použitého přístroje. Měření je navíc zatíženo soustavnou chybou na vyšších frekvencích a syceních, protože nastavování proudu trvalo přístroji několik desítek sekund, během kterých se výrazně zvyšovala teplota měřeného vzorku až o 20–30 °C. Změřená velikost celkových magnetických ztrát se s rostoucím buzením a frekvencí zvyšuje u všech vzorků exponenciálně. Ztráty se zvětšují také se zvyšujícím objemem materiálu magnetického obvodu. Výsledky frekvenčních měření lze nalézt v Příloze F.

Kromě materiálu 42CrMo4 byl změřen také materiál 41CrMo4, který vykazoval obdobné hodnoty jako předchozí materiál. Na Obr. 4.51 a Obr. 4.52 jsou zobrazeny celkové magnetické ztráty s různým sycením na zvolených frekvencích. V obou případech jsou závislosti exponenciální a se vzrůstající frekvencí exponenciálně větší.

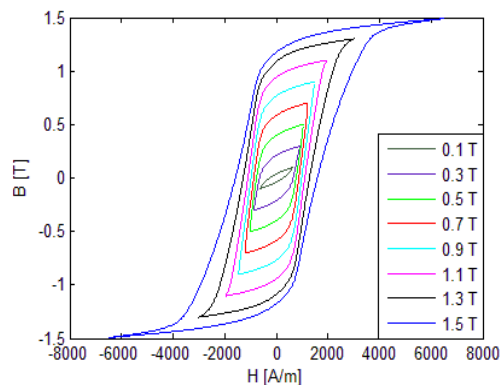


Obr. 4.51 Celkové magnetické ztráty v závislosti na buzení, materiál 41CrMo4

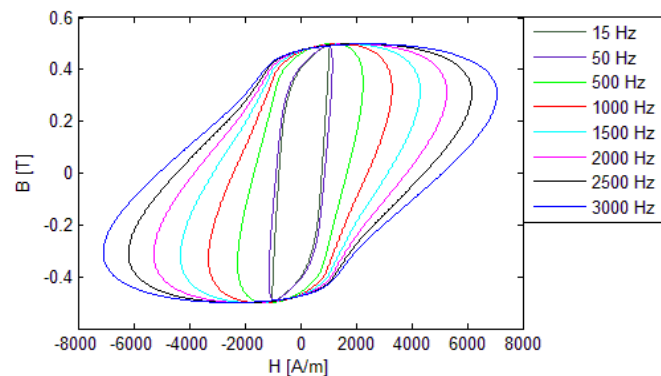


Obr. 4.52 Celkové magnetické ztráty v závislosti na frekvenci, materiál 41CrMo4

Na Obr. 4.53 jsou znázorněny hysterezní křivky pro různé velikosti sycení při frekvenci 50 Hz. Kromě zvyšující se remanentní indukce se hysterezní křivka i rozšiřuje a zvětšuje maximální intenzitu magnetického pole. Na Obr. 4.54 jsou znázorněny hysterezní křivky pro magnetickou indukci o velikosti 0,5 T s různými frekvencemi. Na obrázku je patrné, jak se hysterezní křivka postupně rozšiřuje a deformuje svůj tvar se vzrůstající frekvencí. Příčinou této deformace jsou jednak vzrůstající hysterezní ztráty, ale také i ztráty vířivé, které se zvyšují s kvadrátem napájecí frekvence. Chemické složení i parametry testovaného vzorku lze nalézt v Příloze F.



Obr. 4.53 Hysterezní křivky materiálu 41CrMo4 (15 Hz)



Obr. 4.54 Hysterezní křivky materiálu 41CrMo4 (0.5 T)

V rámci zlepšení magnetických vlastností byl materiál 41CrMo4 podroben i dopování křemíku a sloučeniny CuSn6. Tyto dva materiály byly nanášeny na materiál 41CrMo4, v podobně již připravených toroidů třemi metodami při třech teplotách (800 °C/6 h, 1000 °C/4 h a 1250 °C/2 h). Mezi způsoby nanášení patřilo nanášení obloukem, plamenem a zapékáním dopovaného materiálu v ochranné atmosféře složené z argonu. Zvolené způsoby nanášení ovšem způsobily, že některé testované toroidy byly zničeny a jiné získaly nepravidelný geometrický tvar, kdy část magnetického obvodu byla zúžena až na polovinu zbytku toroidu. Zmíněné deformace byly patrné u všech vzorků, a i když se povedlo některé připravené vzorky magneticky změřit, tak vlastní měření bylo zatíženo velmi vysokou chybou. Navíc dopovaná vrstva časem sama odpadávala, takže pro použití v rotoru vysokootáčkového stroje byla nepoužitelná. Vzorky změřené po dopování, u kterých se podařilo odstranit mechanicky nanesenou přidanou vrstvu, vykazovaly díky nešetřnému tepelnému zpracování horší magnetické parametry než před vlastním dopováním dalšího materiálu. Dodatečné dopování materiálu pro zlepšení magnetických vlastností je celkově nevhodné a mnohem lepší je příprava přímo výrobcem oceli, který může mnohem lépe zasáhnout do chemického složení svého materiálu bez výrazného zhoršení mechanických vlastností. Ukázku výsledku některých dopovaných toroidů lze nalézt v Příloze F.

4.4 Simulace různých tvarů testovaných vzorků

Na trhu existuje několik simulačních programů, které jsou více či méně uživatelsky přívětivé a dá se v nich nastavovat různé množství parametrů. Nejrozšířenější a nejvíce uživatelsky přívětivé jsou obvykle komerční programy. Mezi nejznámější u nás patří například Ansys Maxwell, který lze používat k simulování elektrických strojů. Nevýhodou komerčního software je obvykle nemožnost přesně zjistit vztahy, na jejichž základě se výpočty prováděly a už vůbec se nedají tyto vztahy upravit pro potřeby konkrétní aplikace. Tato omezení nemusí mít speciální firemní a open source programy, kde je možné, když to umožňuje daný program, zasáhnout do vlastního kódu výpočtu simulace a upravit si vybrané vztahy pro konkrétní aplikaci. Mezi nevýhody patří, že tyto úpravy vyžadují hloubkovou znalost dané problematiky a také dost často použití uživatelsky méně přívětivého uživatelského prostředí. Navíc v případě neodborného zásahu do výpočetních vztahů může dojít k neúměrnému zvětšení simulační chyby nebo k úplně chybnému výpočtu s nereálnými výsledky.

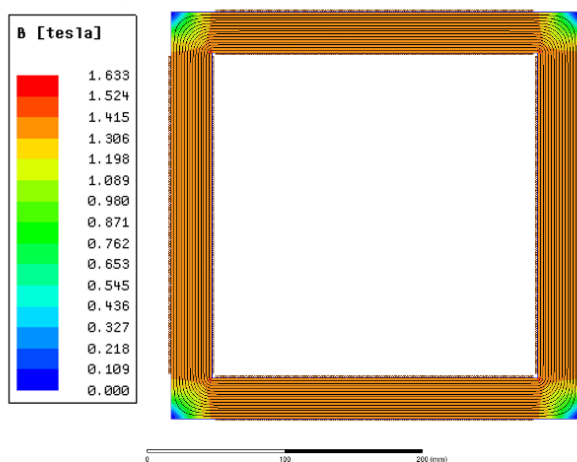
Většina společností zabývajících se konstrukcí a výrobou elektrických strojů využívá obvykle simulační program pro urychlení návrhu nové řady stroje nebo výraznější úpravu stávajícího. Vzhledem k popularitě komerčního software a utajení interních softwarů je dále v této práci uvažován pouze komerční simulační program Ansys Maxwell. S jeho pomocí byla

zjišťována velikost chyby vlivem zjednodušení, které uvažuje tento program při výpočtu koeficientů ztrátových čísel. S těmito čísly se provádí výpočty velikosti magnetických ztrát. Koeficienty jsou zde počítány na základě Steinmetzovy rovnice, jak bylo vysvětleno v teoretické části této práce. V některých situacích ovšem proložení změřených ztrátových křivek není ideální a může být zdrojem chyby simulace, a proto je vhodné vkládaná data adekvátně upravit.

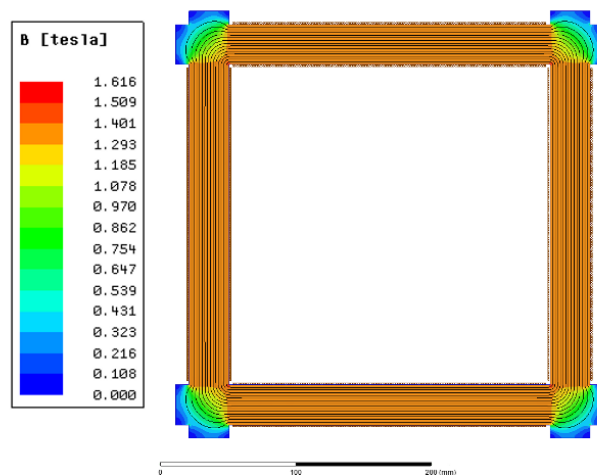
4.4.1 Simulace různých tvarů vzorku ve 2D

V programu Ansys Maxwell bylo v první řadě provedeno několik simulací s ohledem na rozložení magnetického pole pro různé tvary testovaných vzorků. Dle teoretických předpokladů je nejideálnější pro měření magnetických vlastností již zmiňovaný toroidní vzorek. V rámci zjednodušení a reprodukovatelnosti měření se používá Epsteinův rám (čtvercový tvar magnetického obvodu). U tohoto typu měření je upřednostněna hlavně reprodukovatelnost měření, která je větší než u toroidního vzorku. Toroid díky svému ideálnímu tvaru magnetického obvodu vykazuje nejmenší chybu měření, ale každé měření je díky tomu svým způsobem unikátní. V rámci ověření této teorie a zobrazení rozložení magnetického pole byly provedeny 2D magnetostatické simulace pro různé tvary (čtverec, obdélník, trojúhelník a toroid). Kromě těchto teoretických tvarů byl srovnáván také Epsteinův rám s plechy skládanými do čtverce a plechy, které jsou delší a mají v rozích přesahy. Dle normy popisující měření magnetických vlastností na Epsteinově rámu [61], lze totiž používat plechy s délkou 280–305 mm.

Obě simulace pro Epsteinův rám byly buzeny proudem o velikosti 1 A. Na Obr. 4.55 lze vidět zobrazený Epsteinův rám bez přesahů. Rozložení magnetické indukce je v místech s budicím vinutím rovnoměrné o hodnotě 1,342 T, ale problém nastává v rozích, kde není žádné vinutí a sycení je nerovnoměrné. Vnitřní strana rohu je lokálně přesycena vyšší hodnotou magnetické indukce přibližně o 0,2 T více než ve zbytku magnetického obvodu. Vnější stranou rohu magnetického obvodu neteče pro změnu vůbec žádný magnetický tok. Epsteinův rám s přesahy v rozích Obr. 4.56 vykazuje obdobné vlastnosti, co předchází zmiňovaný čtvercový rám. V místech budicího vinutí dosahuje střední hodnota magnetické indukce hodnoty 1,343 T. Dle předpokladu žádný magnetický tok neprotéká v přesazích testovaného vzorku a celkové procento nevyužitého magnetického obvodu se zvyšuje.



Obr. 4.55 Epsteinův rám bez přesahů

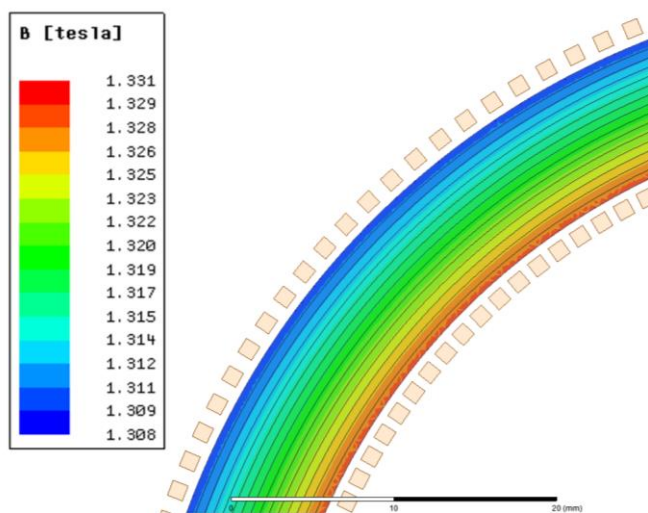


Obr. 4.56 Epsteinův rám s přesahy

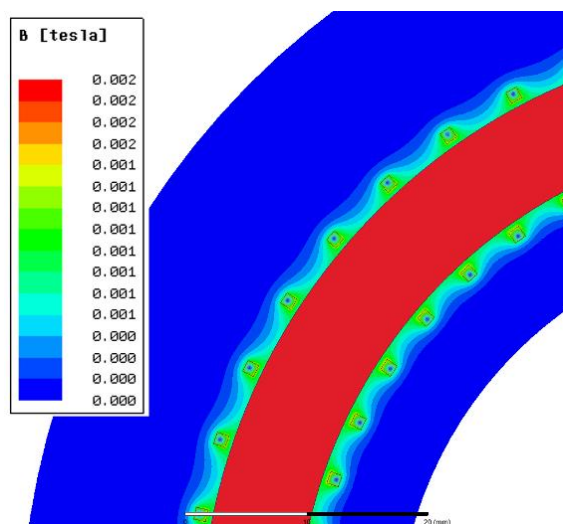
Hodnota magnetické indukce na střední délce železa se pohybuje u Obr. 4.55 od 1,09 T do 1,34 T s průměrnou hodnotou 1,33 T. V případě vzorku na Obr. 4.56 se jedná o minimální indukci 1,0 T, maximální 1,34 T a průměrnou hodnotou 1,32 T. Tato nerovnoměrnost má v rámci simulace za následek výpočtu chybné velikosti celkových magnetických ztrát. Velikost

magnetických ztrát byla 626 W/m^3 (vzorek bez přesahů Obr. 4.55) a 516 W/m^3 (vzorek s přesahy Obr. 4.56). Simulace byla provedena na frekvenci 50 Hz pro materiál M330-35A. Z výsledků simulací je zřejmé, že při použití vzorků s přesahy dochází k mírnému zkreslení výsledků simulace magnetického měření. Vlivem větší hodnoty nevyužitého materiálu dojde k výpočtu menší hodnoty magnetických ztrát, než která je pro daný materiál typická. Při reálném měření se velikost ztrát počítá pouze z části magnetického obvodu, která se nachází pod budícím vinutím a zbytek materiálu testovaného vzorku se zanedbává. Díky tomu je sice v rozích omezen vliv nerovnoměrného sycení magnetického obvodu, ale přijaté zjednodušení může některé odchylky měřených vlastností skrýt.

U toroidního vzorku je magnetická indukce rovnoměrně rozložená po celé délce magnetického obvodu viz Obr. 4.57. Nastává zde mírné zvýšené sycení na vnitřní straně toroidu, které se vykompenzuje nižším sycením na vnější hraně. Při tloušťce mezikruží 8 mm jsou rozdíly mezi hranami v magnetické indukci 0,023 T a dá se říci, že magnetický tok je rovnoměrně rozložený uvnitř magnetického obvodu.



Obr. 4.57 Detail rozložení magnetického pole v toroidu s určitým počtem závitů



Obr. 4.58 Zobrazení rozložení rozptylového toku od vinutí ve vzdálenosti 0,5 mm od testovaného materiálu

Rozložení rozptylového magnetického pole při použití jednotlivých vodičů budícího vinutí lze nalézt na Obr. 4.58. Magnetický tok v železe zde dosahuje hodnoty 1,32 T, ale pro zobrazení rozptylového toku bylo nastavena maximální zobrazovaná hodnota magnetické indukce na 0,002 T, a proto se materiál železa jeví jako silně přesycený. Magnetické rozptylové pole mezi vinutím a testovaným vzorkem dosahuje při vzdálenosti 0,5 mm pouze 0,002 T a je tedy pro měření magnetických vlastností při této vzdálenosti a sycení zanedbatelné. Další výsledky simulací ostatních netypických tvarů nebo vinutí lze nalézt v Příloze G. Další tvary magnetického obvodu zobrazené v Příloze G dopadly dle předpokladů a magnetický tok byl nerovnoměrně rozložený. Toroidní vzorky byly simulovány s dvěma různými výpočetními sítěmi pro 5158 elementů a pro 241690 elementů. Získané výsledky byly z obou simulací stejné a extrémní množství elementů nebylo v dalších simulacích nutné. Dále toroidní vzorek s poměrem průměrů 1,5 (100 mm/50 mm) vykazoval odchylku magnetické indukce o téměř 0,1 T (mezi vnitřním a vnějším průměrem). Simulace na tomto toroidu Obr. G. 10 potvrdila předpoklad, že větší hodnota poměru průměrů je škodlivá a nežádoucí z pohledu chyby měření. Dále byl otestován vliv vzduchové mezery na velikost magnetické indukce. V případě zanesení čtyř vzduchových mezer do magnetického obvodu, každá v délce 1 mm, došlo při zachování stejné velikosti

proudového napájení k propadu velikosti magnetické indukce v jádře o 1,2 T. Magnetický obvod s takovou vzduchovou mezerou je dle předpokladů neměřitelný a výsledná velikost magnetického toku je součtem relativní permeability vzduchu a testovaného materiálu. Relativní permeabilita vzduchu je výrazně menší než železa, a proto se výsledné parametry podobají spíše parametrům vzduchové mezery. Výraznější rozptyl magnetického toku kolem vzduchové mezery nebyl pozorován a tok se uzavíral nejkratší množnou cestou opět v testovaném materiálu. V rámci simulací byla dále ověřena možnost použití nerovnoměrného rozmístění závitů budicího vinutí, kde byla zjištěna odchylka 0,1 T. V tomto případě bylo nutné zvýšit napájecí proud, aby se vykompenzovalo menší množství závitů budicího vinutí, a přitom dosaženo přibližně stejné hodnoty magnetického pole. Odchylka v magnetické indukci byla v uzavřeném vzorku pouze 0,1 T a byla menší, než se očekávalo. Vliv nerovnoměrného vinutí na měřené parametry není v případě menší odchylky umístění závitů na testovaném vzorku příliš výrazný. Nakonec byl ještě otestován vliv plného měděného vodiče versus jednotlivé závity budicího vinutí. Do plného měděného vodiče Obr. G. 17. byl samozřejmě fiktivně přiřazen stejný počet budicích závitů jako v Obr. G. 9. Výsledky velikosti magnetické indukce se v obou simulacích shodují a potvrdily, že je možné použít v simulaci zjednodušení budicího vodiče.

4.4.2 Simulace rozložení magnetické indukce ve 3D

Simulace v rámci 2D patří mezi základní možnosti provedení výpočtu výsledných parametrů testovaného stroje. Má sice svá omezení proti komplexní 3D simulaci, ale 2D simulace jsou již dobře vyřešené a chybějící části u obvyklých strojů bývají v programu dopočítávány. Hlavní nevýhodou 3D simulací bývá vysoký výpočetní čas, který zůstane dlouhý, i když se maximálně využije symetrie magnetického obvodu. Pro zjištění přesnosti simulací toroidních vzorků, byly tyto vzorky simulovány i ve 3D. Simulace byly zaměřeny pro různé velikosti průřezu magnetického obvodu. Vnější průměry u všech vzorků byly 100 mm, vnitřní průměry 84 mm, velikost výseče byla 10°, střední délka magnetického obvodu 289 mm, počet závitů primárního vinutí byl 36 v celém toroidu, vzdálenost vinutí od testovaného vzorku byla 0,5 mm a proud 1,8 A. Ostatní parametry lze najít přehledně zobrazené v Tabulka 4.15.

Tabulka 4.15 Parametry testovaných vzorků

Rozměry vzorků	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	
	Toroid	Toroid	Toroid	Toroid	
Výška vzorku	8	2,8	0,35	8	[mm]
Délka magnetického obvodu	289	289	289	289	[mm]
Průřez	64	22,4	2,8	50,3	[mm ²]
Tvar průřezu	Čtverec	Obdélník	1 plech	Kruh	

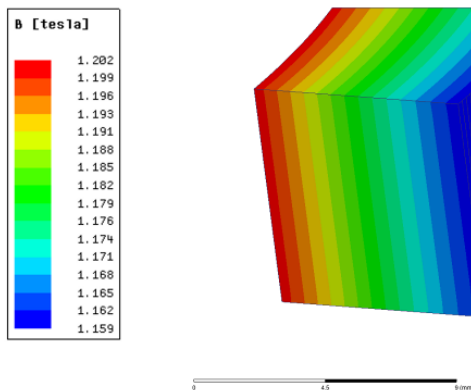
Výsledky simulací (Tabulka 4.16) zobrazují stejné hodnoty magnetické indukce pro všechny hranaté průřezy. Kulatý průřez se liší pouze minimálně. Zobrazená hodnota indukce v této tabulce byla vypočítaná jako střední hodnota magnetické indukce v celém průřezu. Parametry se shodují jak pro magnetostatickou, tak i frekvenční simulaci při 50 Hz. Velikost celkových magnetických ztrát zůstává stejná pro všechny průřezy. Zde je vidět zkreslení v podobě stejné hodnoty magnetických ztrát i pro obdélníkový průřez o malé výšce (1 plech).

Výsledky simulací došly k závěru, že simulace jednoduchých útvarů jako je toroidní vzorek vykazují stejné výsledné hodnoty jak pro 2D, tak pro 3D simulace. Použití 3D simulace je spíše žádoucí u komplikovanějších útvarů, které se nedají zjednodušit bez vzniku další chyby,

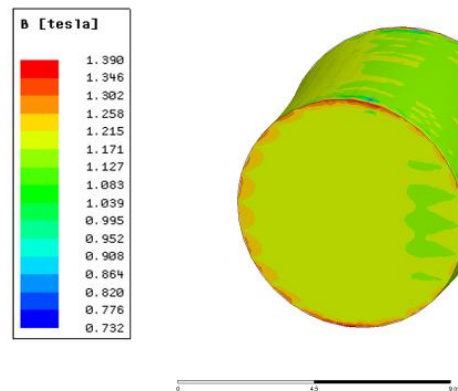
jako jsou například atypické elektrické stroje pro speciální aplikace nebo k optimalizaci v rámci získání vyšší účinnosti elektrického stroje.

Tabulka 4.16 Parametrů vzorků a výsledků simulace

		B_{statika}	$B_{50\text{Hz}}$	V_{Fe}	γ	$P_{c, 50\text{Hz}}$	$P_{s, 50\text{Hz}}$
	Tvar	[T]	[T]	[m ³]	[kg/m ³]	[W]	[W/kg]
Vzorek 1	Čtverec	1,17944	1,19555	5,14E-07	7650	1,00E-02	2,553
Vzorek 2	Obdélník	1,17944	1,19555	1,80E-07	7650	3,51E-03	2,553
Vzorek 3	1 plech	1,17944	1,19555	2,25E-08	7650	4,39E-04	2,553
Vzorek 4	Kruh	1,17939	1,19553	4,03E-07	7650	7,87E-03	2,553



Obr. 4.59 Čtvercový průřez



Obr. 4.60 Kulatý průřez

4.4.3 Feritové magnety HTY45E

Feritové magnety patří mezi cenově nejdostupnější a jsou použity i v uvažovaném konstruovaném synchronním reluktančním motoru s permanentními magnety, který je přepočítán v rámci této práce. Výrobce zvolil typ magnetů HTY45E a jejich geometrické rozměry vypočítal na základě údajů poskytnutých výrobcem magnetů. Jak již bylo v předchozích kapitolách nastíněno, tak magnetické vlastnosti materiálů jsou velice citlivé na způsob výroby a teplotu. Curieho teplota pro demagnetizaci bývá velmi nízko proti magneticky měkkým materiálům a hrozí zde částečná nebo i úplná demagnetizace permanentního magnetu.

Zmagnetizovaný materiál použitého feritového magnetu HTY45E byl rozřezán vodním paprskem a následně měřen na přístroji PermaGRAPH. Geometrické rozměry, kromě tloušťky testovaného materiálu byly přizpůsobené měřicímu zařízení. Byly měřeny dva typy vzorků – čtvercový (14x14x3 mm; hmotnost 3,233g) a kulatý (průměr 16 mm, výška 3 mm; hmotnost 3,083 g). Oba vzorky byly měřeny pomocí snímací cívky umístěné v epoxidové destičce s kulatým otvorem pro umístění testovaného vzorku s průměrem 25 mm.

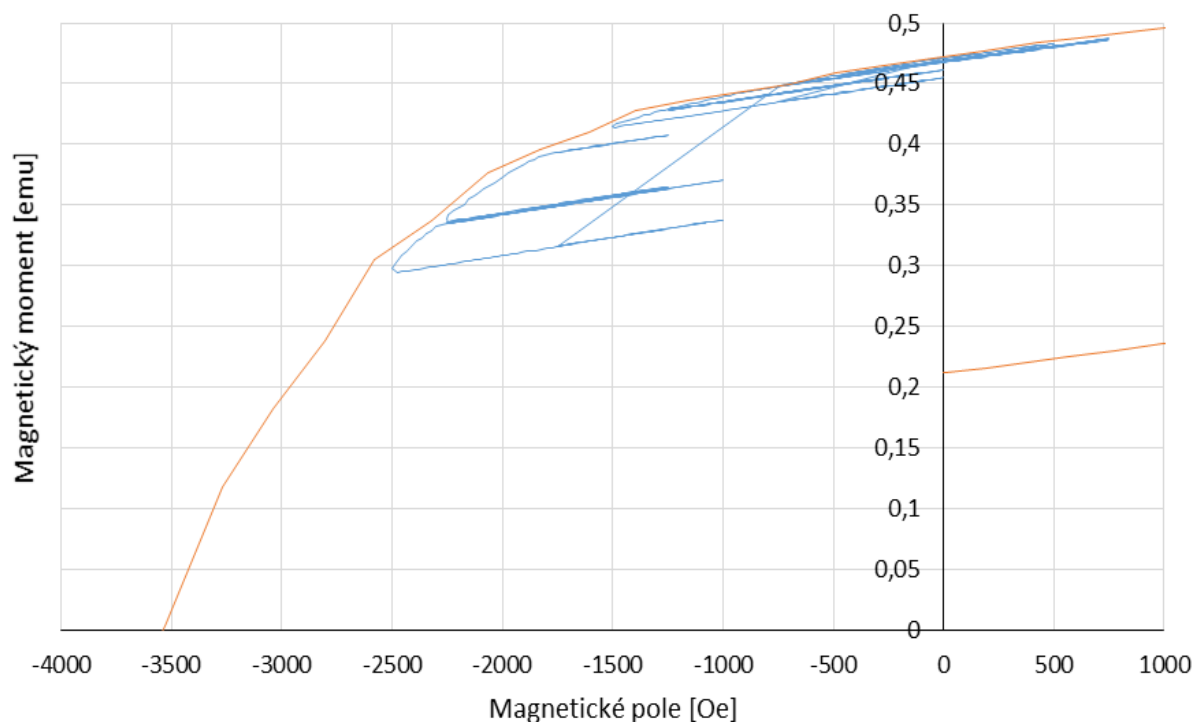
Před každým měření bylo nutné provést kalibraci měřicích sond pro kvazistatické měření hysterezní křivky ve druhém kvadrantu. Úskalím tohoto měření bylo, že feritové magnety jsou citlivé na demagnetizaci, a i když dojde k zastavení měření na nulové hodnotě magnetické indukce, tak je materiál postupně demagnetizován, protože se v rámci hysterezní křivky dostane za koleno ve druhém kvadrantu. Bez počáteční magnetizace testovaného vzorku došlo již

při čtvrtém měření k poklesu remanentní indukce na 10 % hodnotu, než byla po řádné magnetizaci. 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 4.17 s hodnotami poskytnutými výrobcem. Všechna měření byla prováděna při pokojové teplotě v důsledku absence vyhřívání budících pólových nástavců, a proto je možné je porovnávat pouze při teplotě 20 °C.

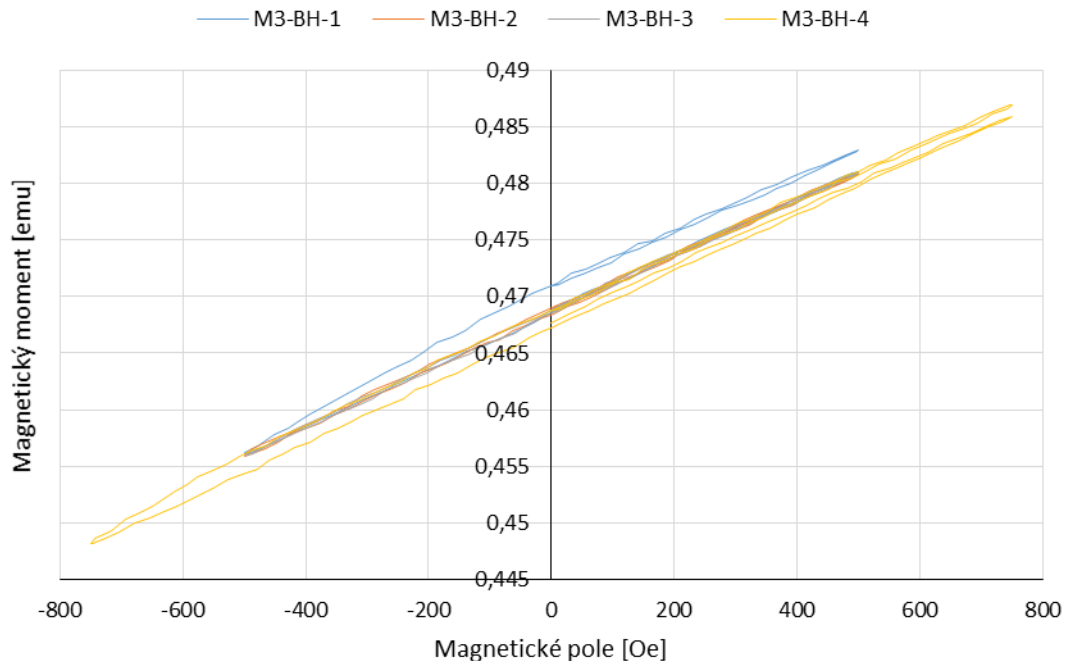
Tabulka 4.17 Parametry použitého magnetu HTY45E

HTY45E	Výrobce – zadáno $\vartheta = 20\text{ °C}$	Měřeno		
		Čtverec $\vartheta = 20\text{ °C}$	Kolečko $\vartheta = 20\text{ °C}$	
B_r	430 (420)	479	443	mT
H_c	330 (318)	261	256	kA/m
$(BH)_{\max}$	35 (33,5)	44	38	kJ/m ³
μ_r	1,03691 (1,05102)	1,460445	1,377063	
ρ		1,0E+10		$\mu\Omega\cdot\text{cm}$
σ		0,01		S.m

Hodnoty od výrobce pro 20 °C jsou získané z poskytnutých interních datasheetů. V kulatých závorkách jsou minimální garantované hodnoty. Typické hodnoty magnetování jsou mimo závorku. Červeně označené hodnoty jsou změřené na přístroji PermaGraph. Vzorky pro magnety byly připraveny vodním paprskem, aby jejich magnetizace byla ovlivněna co nejméně.



Obr. 4.61 Hysterezní křivka HTY45E + minoritní hysterezní křivky

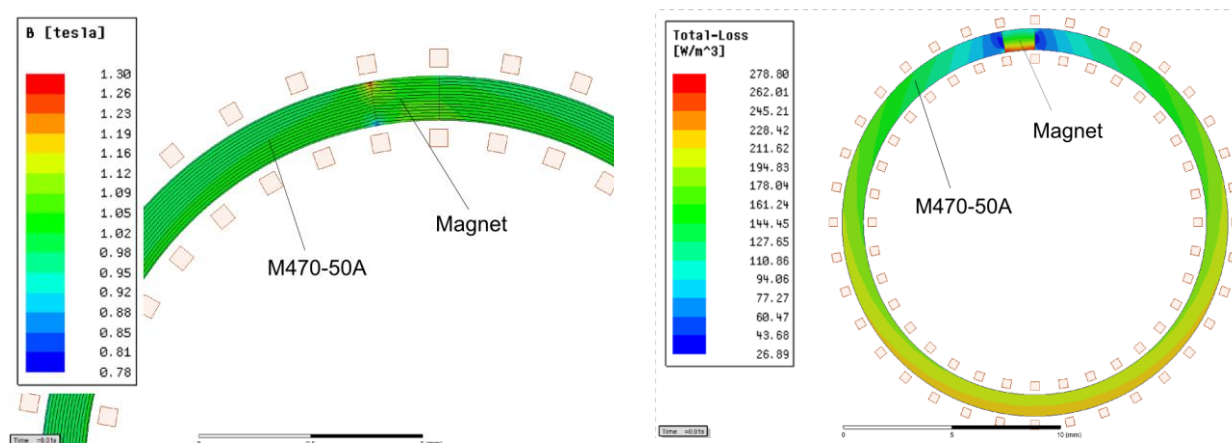


Obr. 4.62 Minoritní hysterezní křivky při výchozím poli 0 Oe

Kromě měření na Permagrafu byl materiál HTY45E přeměřován i na vibračním magnetometru PPMS v pokojové teplotě 20 °C a při teplotě 80 °C. Testovaný vzorek byl velmi malý o hmotnosti 0,011 g a objemu přibližně 2,245 mm³. Vzhledem k tomu, že se jedná o úplně jiný typ měření, tak i výsledné hodnoty nejsou udávány v jednotkách SI ale CGS. Přepočet by byl sice možný, ale testovaný vzorek byl příliš malý a jeho přesné geometrické rozměry nebyly přímo změřitelné, jelikož se jednalo o odštípnuté zrnko materiálu. I malá odchylka v rozměrech potom způsobuje zásadní rozdíly ve velikosti přepočtené magnetické indukce nebo intenzity magnetického pole. 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. Minoritní křivka klesala podle hlavní hysterezní křivky a při opětovném zvyšování magnetického pole pouze lineárně rostla a pak klesala do původní hodnoty. Z naměřených hodnot je patrné, že feritový magnet je velmi náchylný na demagnetizaci a je vhodné znát velikost každé změny magnetického pole při běhu synchronního reluktančního motoru s permanentními magnety. Magnet po prvním zapnutí elektrického stroje teprve najde svůj pracovní bod a až poté vykazuje stabilní parametry. V příloze H lze nalézt další výsledky měření.

V rámci ověření chování magnetu v magnetickém obvodu, byl připraven jednoduchý model toroidu s vloženým permanentním magnetem SmCo ve směru magnetického pole. Na základě Obr. 4.63 je patrné, že permanentní magnet vložený do magnetického obvodu se chová zcela standardně a žádná sledovatelná změna velikosti magnetické indukce se zde nevyskytuje. Výjimku tvoří pouze rohy permanentního magnetu, kde byla komplikovanější síť (mesh). Výpočet velikosti hysterezních ztrát nelze v Maxwellu pro permanentní magnety zadat, protože tyto ztráty jsou obvykle zanedbatelné nebo nulové, a proto knihovna v Maxwellu neobsahuje žádné zadané ztrátové křivky. Pro změření ztrátových křivek by musely být magnety podrobeny

měření v kalorimetrické komoře, a i zde by měření bylo pravděpodobně zatíženo velkou chybou. Obvyklou variantu pro změření velikosti ztrát, frekvenční měření, není možné pro většinu permanentních magnetů provádět v důsledku extrémně široké hysterezní křivky. V základním nastavení je v simulaci možné u permanentních magnetů nastavit pouze výpočet ztrát způsobených vířivými proudy, protože se jedná o plný materiál a majoritní složku celkových ztrát v tomto materiálu. Zbytek magnetického obvodu je složený z plechů, takže výpočet celkových magnetických ztrát je prováděn na základě koeficientů získaných ze zadaných ztrátových křivek.



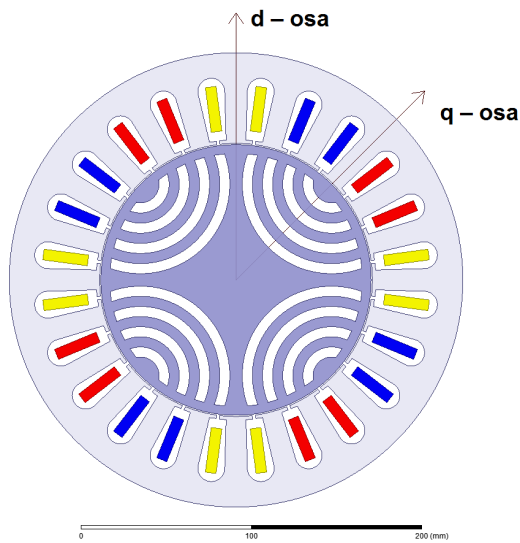
Obr. 4.63 Velikost magnetické indukce a celkových ztrát v toroidu s vloženým magnetem SmCo do obvodu na 1,2 T

Na Obr. 4.63 v železe M470-50A jsou počítány celkové magnetické ztráty a v magnetu ztráty vířivými proudy (orientace ve směru osy x)

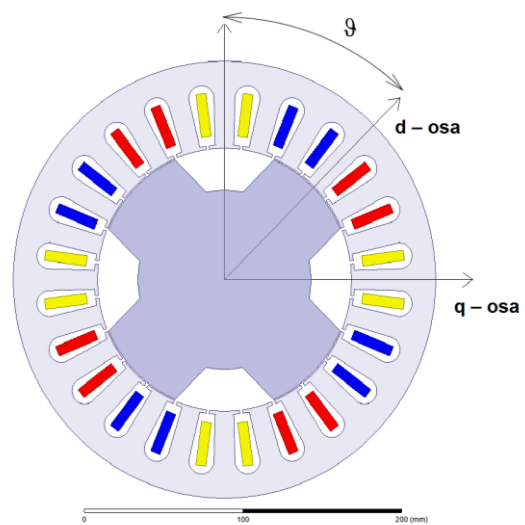
4.5 Simulace reluktančního motoru s magnety

Reluktanční motor je elektrický stroj, jenž je odvozen od synchronních strojů a je založen na změně magnetického odporu (reluktance) v rotoru stroje. Ve své základní podstatě reluktanční motor využívá změny vodivosti v příčné a podélné ose rotoru. Pro znázornění, nastavení i výpočty se využívá teorie obecného stroje, kde je budicí osa (podélná) označena jako Ld a druhá jako (příčná) neboli Lq. Různé vodivosti v osách d, q lze dosáhnout různými tvary vyřezaných vzduchových bariér. Změny indukčností vedou k tomu, že magnetický tok se uzavírá cestou nejmenšího odporu tedy v ose Ld. Naopak osa Lq je v rotoru izolovaná vzduchovými mezerami a tok se neuzavírá přes tyto části. Na Obr. 4.64 a Obr. 4.65 lze vidět čtyřpólové reluktanční stroje s hladkým rotorem a vyniklými póly včetně znázornění umístění d, q os. Na Obr. 4.66 je zobrazen synchronní reluktanční motor s permanentními magnety. Na Obr. 4.67 je vidět řez motoru s rozložením magnetického pole, včetně zobrazení magnetických siločar. V rámci zjišťování a ověřování měřených parametrů byl samozřejmě používán řez stroje poskytnutý výrobcem, který ale podléhá v současné době utajení.

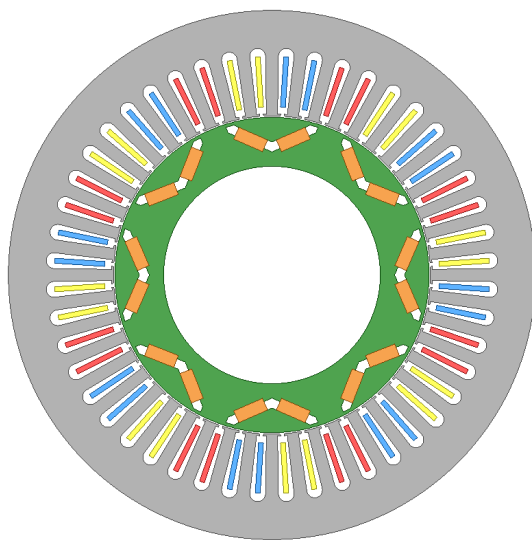
Reluktanční motory mohou být konstruovány pouze s rotorem složeným z plechů bez pomocného vinutí a tím snížit cenu použitého materiálu. V případě požadavku na vyšší velikost momentu lze magnetický tok v rotoru podpořit permanentními magnety. Nevýhodou je ovšem nutnost použití měniče frekvence, aby bylo možné provozovat tento typ motoru [62]. Limitem u těchto motorů, kromě poměru d, q os je také pevnost materiálu. V příčné ose se vyskytují u některých typů rotorů (např. Obr. 4.64) velmi výrazné vzduchové bariéry a mechanická pevnost plechu je snížena.



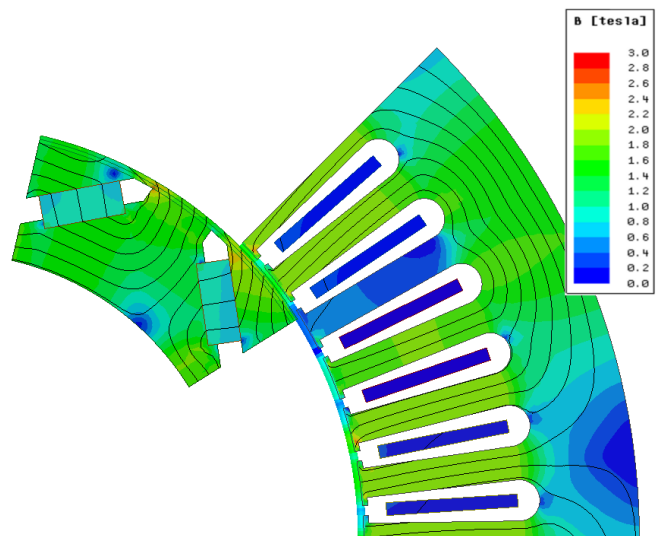
Obr. 4.64 Varianta reluktančního motoru s hladkým rotorem



Obr. 4.65 Varianta reluktančního motoru s vyniklými póly



Obr. 4.66 Model motoru Toyota Prius – synchronní reluktanční motor s vnořenými magnety



Obr. 4.67 Rozložení magnetické indukce v modelu motoru Toyota Prius

4.5.1 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 transienčních změn elektromagnetických polí v elektrických strojích [50]. Vyrobený stroj byl danou společností změřen, ale nevyhověl požadovaným parametrům. Všemi možnými příčinami proč daný stroj nevyhověl, se zabývá článek [51]. V článku je zmíněných několik pravděpodobných příčin, které vedly k nevyhovujícím výstupním parametrům stroje, ale tato práce se podrobněji zabývá pouze vlivem opracování materiálu plechů a vlastnostmi permanentních magnetů. Výpočty

výrobce se v článku pro první variantu návrhu významně od měření lišily i při započítání korekčních koeficientů magnetických ztrát s vlivy výroby. Výrobce elektrického stroje využíval běžně dostupné obecné materiálové vlastnosti získané z datasheetu materiálů, které následně upravil korekčním koeficientem. Tyto korekční koeficienty ovšem nebyly při tvorbě této práce známy. Ke studiu vlivu různých materiálových vlastností na výsledný návrh stroje není znalost těchto koeficientů důležitá, ale stačí sledovat velikost změny požadovaných výstupních parametrů stroje. Během dalšího průběhu výroby je materiál vystavován ještě dalším mechanickým nebo tepelným vlivům, které také ovlivňují výstupní charakteristiky, takže úplné shody s měřením nebude nikdy dosaženo bez použití, byť menších korekčních koeficientů. Zjištění vlivu materiálu pouze zpřesňuje vlastní výpočet, aby nebylo nutné používat korekční koeficienty o vysoké hodnotě. Testovaný stroj měl následující štitkové parametry:

Tabulka 4.18 Parametry testovaného motoru

Počet pólů	8
Výkon	1700 W
Moment	6,7 Nm
Jmenovitý proud	4,4 A
Napájecí frekvence	163,3 Hz
Otáčky rotoru	2450 min ⁻¹

Vlastní porovnání je založeno na hodnotách poskytnutých výrobcem z měření, jeho simulací v programu Femag a 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 Tabulce 4.19

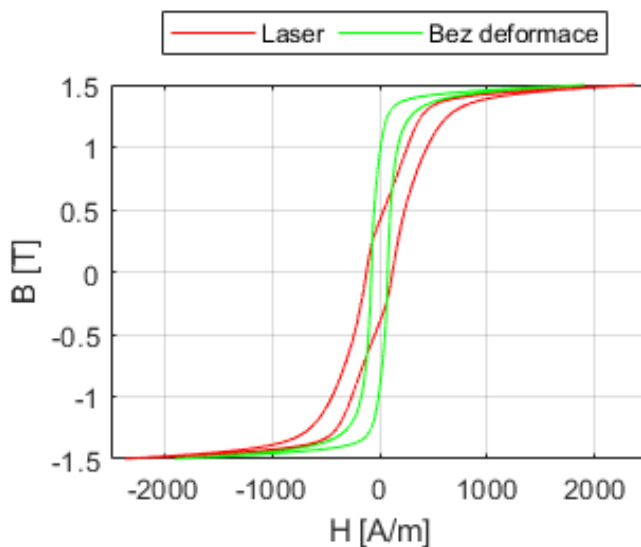
Tabulka 4.19 Parametry použitého magnetu HTY45E

HTY45E	Výrobce – zadáno	Měřeno – čtverec	Měřeno – kolečko	Výrobce – zadáno	Článek [52]	Článek [52]	
	θ = 20 °C	θ = 20 °C	θ = 20 °C	θ = 80 °C	θ = 20 °C	θ = 80 °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			μΩ.cm
σ				0,01			S.m

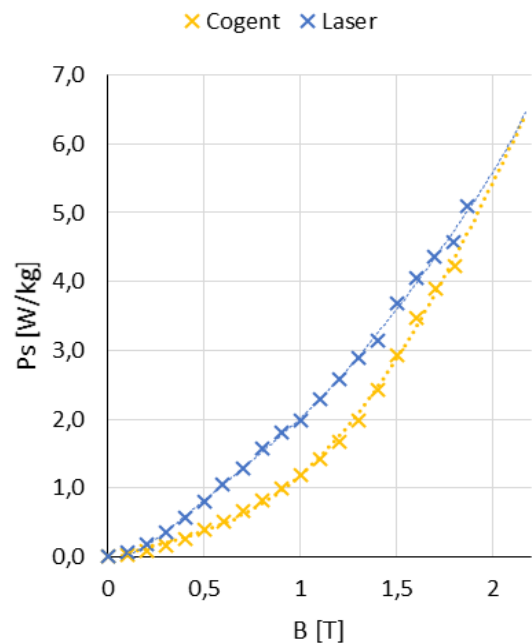
Hodnoty od výrobce magnetů poskytnuté výrobcem motoru pro 20 °C a pro 80 °C jsou označené modře a jsou získané z interních poskytnutých datasheetů. Na základě těchto vlastností prováděl výrobce vlastní prvotní simulace. V kulatých závorkách jsou minimální garantované hodnoty a typická hodnota magnetování je mimo závorku. Červeně označené hodnoty jsou

vlastní změřená data na přístroji PermaGraph. Zeleně označené hodnoty vlastností permanentního magnetu byly získané z článku [52] a byly měřené na obdobném přístroji i při teplotě 80 °C.

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 mezikruží 6,5 mm. Změřené hysterezní křivky jsou zobrazeny na Obr. 4.68. Data použitá výrobcem jsou z Epsteinova rámu a plechy bývají obvykle připraveny stříhem/ražením. Rozdíly v použitých magnetizačních křivkách, velikosti magnetických ztrát i relativní permeabilitě lze vidět na následujících obrázcích Obr. 4.69, Obr. 4.70 a Obr. 4.71. Velikost magnetických ztrát se výrazně liší při nižším sycení a to až dvojnásobně při hodnotě 1,0 T. Vzhledem k tomu, že se v této oblasti vyskytuje většina magnetického obvodu při běhu elektrického stroje, tak je nutné tento vliv vzít v úvahu. Celkově laserované plechy mají spíše lineární nárůst magnetických ztrát a nižší sklon magnetizační křivky jenž se projevuje díky zhoršení velikosti relativní permeability pro nižší sycení.

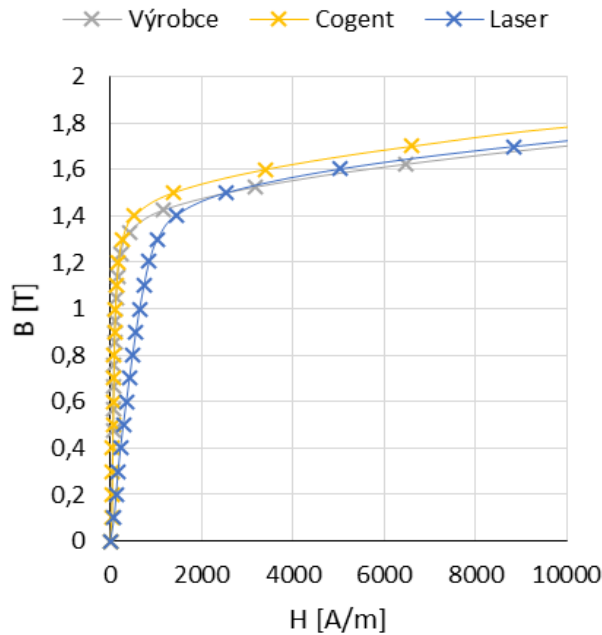


Obr. 4.68 Srovnání deformované křivky po pálení laserem a křivky bez deformace M330-35A

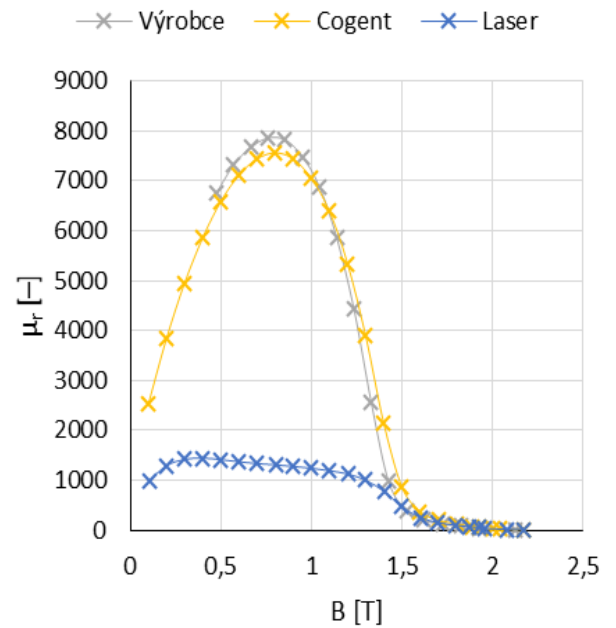


Obr. 4.69 Srovnání použitých materiálů – celkové magnetické ztráty, M330-35A

Z tvaru hysterezní křivky je také patrný různý sklon křivky při magnetizaci a demagnetizaci v rozsahu sycení od 0,3 T do 1,5 T. Tento sklon na první pohled budí zdání, že laserování mění chemické složení materiálu, ale tato úvaha není správná. Rozdílný sklon je způsoben zaneseným pnutím způsobeným extrémním rychlým ohřevem testovaného materiálu a následného extrémně rychlého zchlazení vlivem velmi dobré tepelné vodivosti materiálu. Toto pnutí se nejvíce projevuje právě ve střední oblasti nasycení materiálu, kde brání natáčení a spojování magnetických domén do požadovaného směru.

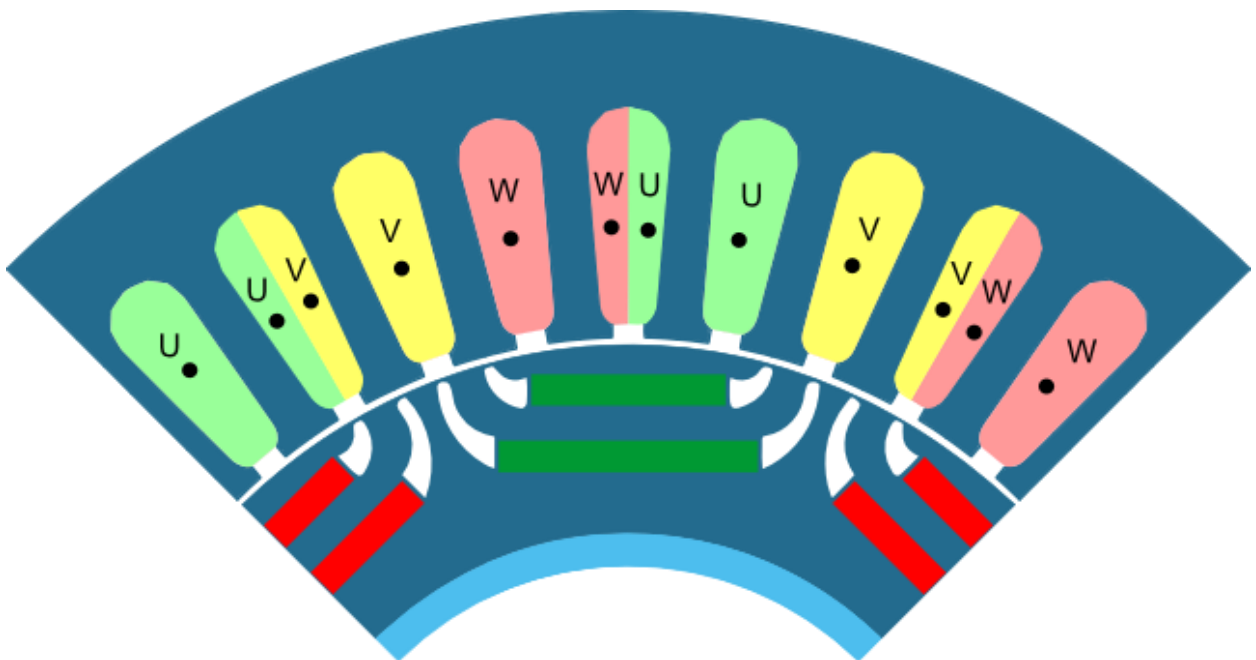


Obr. 4.70 Srovnání použitých materiálů – magnetizační křivky, M330-35A



Obr. 4.71 Srovnání použitých materiálů – relativní permeabilita, M330-35A

Řez plechu testovaného motoru s vinutím lze vidět na Obr. 4.72. 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. 4.72 Model testovaného motoru s upraveným rotorem i statorem [51]

V rámci simulace bylo přijato několik zjednodušení, která mohou být zdrojem chyb. Magnetizace feritového magnetu HTY45E, byla měřena na přístroji PermaGRAPH na kterém

není doporučováno u feritových magnetů měřit počáteční magnetizaci, protože magnet mohl být již mírně demagnetován a je nutné jej před měřením v druhém kvadrantu dostatečně namagnetovat v prvním kvadrantu. Při opakovaném měření bez plného namagnetování dochází k postupné demagnetizaci materiálu a klesání hodnoty remanentní indukce. Z pohledu zrychlení simulace byla použita podrobnější síť (mesh) pouze v kritických místech modelu, která se podílejí na tvorbě momentu, jako vzduchová mezera, reluktanční mezery, povrchová vrstva rotoru a zubů ve statoru. Mezi další zjednodušení patřilo simulování ve 2D a také proudové napájení, které ovšem použil i výrobce daného motoru. Z pohledu magnetismu by bylo vhodnější volit napěťové napájení, ale délka simulace je poté větší a je nutné znovu zvolit nový zátěžný úhel nebo počáteční natočení rotoru.

Výsledné srovnání různých simulací s měřením lze nalézt v Tabulka 4.20. Porovnání je provedeno pro hodnoty získané měřením, simulací výrobce v programu Femag a různými simulacemi v programu Ansys Maxwell, kde se testoval vliv použití různých materiálů plechů nebo magnetů. Vlastnosti plechů byly použity od výrobce Sura Cogent nebo byly 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 [52] pro teplotu 80 °C. Vzhledem k tomu, že jsou magnety náchylné na demagnetizaci vyšší teplotou, která způsobuje jejich výraznou změnou vlastností, tak je nutné provést při návrhu stroje správný tepelný výpočet stroje, aby nedoházelo k výraznějšímu ohřevu magnetů. Feritové magnety mají velmi vysokou rezistivitu, a proto se zde nevyskytují vířivé ztráty. Během pohybu kolem pracovního bodu také nedochází k tvorbě hysterezních křivek a magnetické ztráty jsou zanedbatelné. Nadměrný ohřev těchto magnetů musí být způsoben nesprávným tepelným návrhem elektrického stroje.

Tabulka 4.20 Srovnání výsledných parametrů reluktančního motoru

Zdroje dat – plechy	Cogent – datasheet			Laser – změřeno			Výrobce měřeno	Simulace výrobce	
	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
Účíník	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

Srovnání simulací pro stejné vstupní parametry mezi programem Femag a Maxwell nevyšlo úplně stejně ze tří důvodů. Parametry použitého plechu nebyly úplně stejné jako u výrobce. Velikost nastaveného zátěžného úhlu a počátečního natočení nebyla v simulacích Femag

a Maxwell stejná. 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 Tabulky 4.20 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 min. tří různých variant toroidních vzorků, odvozených od geometrie navrženého motorového plechu, by došlo k dalšímu zpřesnění simulace.

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 4.21. 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 celkovém 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 4.21 Srovnání parametrů reluktančního motoru bez permanentních magnetů

Zdroj dat – plechy	Cogent – datasheet	Laser – změřeno	Odchylka
B (air gap) [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 %

5 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, jak byl ovlivněn vlivem výroby apod., 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 měření na vyšších frekvencích je u něj obtížné z důvodu fixního množství primárních a sekundárních závitů. Další nevýhodou je nerovnoměrné rozložení magnetického pole v rozích magnetického obvodu. Vzdálenost řezných hran je u tohoto materiálu fixně daná a není možné provádět měření na různých vzdálenostech řezných hran, což toroidní vzorek umožňuje. Toroidní vzorek umožňuje libovolnou volbu velikosti, ale je nutné dodržet, aby poměr průměrů vnějšího a vnitřního nebyl větší jak 1,2 a vždy bylo měřeno současně několik plechů v daném vzorku. Minimální množství jsou obvykle čtyři kusy dynamoplechů, ale záleží také na celkové velikosti toroidu. Ideální je se co nejvíce přiblížit čtvercovému průřezu magnetického obvodu. Při měření příliš nízkého počtu plechů dochází ke vzniku chyby měření u vyšších sycení. Celková velikost toroidu se dále odvíjí od velikosti požadovaného elektrického stroje, aby magnetický obvod byl obdobně dlouhý a také od parametrů napájecího zdroje s operačním zesilovačem. Příliš velký vzorek v poměru k nízkému počtu primárních závitů je obtížné vybudit a příliš malý vzorek se zase rychleji od budícího vinutí zahřívá. Za adekvátní je možné považovat ještě vzorek okolo vnějšího průměru 120 mm. Minimální velikost vnitřního průměru se odvíjí primárně od obvodové délky vnitřní hrany, na kterou by mělo být možné navinout dostatečné množství primárních závitů. Na toroidních vzorcích je možné dosahovat vyšších frekvencí buzení díky větší variabilitě volby počtu sekundárních závitů. V rámci testování na extrémní velikosti magnetických polí je vhodnější měřit otevřené vzorky, protože se zde snáze dosahuje větších magnetických polí. Nevýhodou tohoto typu měření je nutnost počítat s demagnetizačním faktorem, který slouží ke korekci změřených hodnot.

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, protože je velmi hrubá a pórovitá (velké otřepy), což zkresluje magnetické měření a snižuje celkové plnění železa ve svazku. 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. Někteří výrobci totiž udávají teplotní odolnost izolace při žíhání v inertním plnu nebo vakuu pouze do 500 °C, ale vlastní uvolňování pnutí v rozumné rychlosti začíná až na této teplotě a vyšší. 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 velikostí teploty žhání. 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. Jako ideální rozměry pro otestování se hodí různé mechanické propojky, šířka statorových i rotorových zubů. Případně jiné části z geometrické stroje, kde jsou řezné hrany blízko sebe. V případě zanedbání tohoto vlivu dochází ke změření jiných hodnot magnetických parametrů, než se v elektrickém stroji vyskytují. Řezné hrany mohou být od sebe příliš vzdálené a vliv výroby se projeví pouze minimálně.

Při magnetickém měření plného materiálu se velmi obtížně volí velikost testovaného vzorku, protože s jeho rostoucí 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 díky limitům 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 samozřejmostí poměr průměrů menší než 1,2 a čtvercový průřez magnetického obvodu. Navíc je zde nutné provádět měření s maximální rychlostí, aby se vzorek během měření nestihl ohřát a neztratil výsledná data. Pokud dojde k jeho ohřátí, je nutné s dalším měřením vyčkat do jeho vychladnutí na teplotu minimálně 25 °C. Vyšší teplota má u plného materiálu za následek vyšší rezistivitu materiálu a zdánlivé zlepšení magnetických vlastností na nízké teplotě, i když už došlo ke zvýšení teploty. 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 vysokootáčkové stroje a reluktanční motory. V této práci byla zvolena aplikace změřených dat a ověření změny výstupních 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 vyhřívání měřicích pólových nástavců, takže magnety byly přeměřeny pouze při teplotě 20°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 v jejich vlastním materiálu. V rámci srovnání různých kombinací materiálů plechů s různými hodnotami magnetů bylo zjištěno, že materiál magnetů ovlivňuje velikost celkového momentu a účinku stroje. 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, účinku, a účinnosti. Vlastní orientace magnetování magnetů a velikost jejich remanentní magnetické indukce lze ověřit pomocí Tesla metrů před vkládáním magnetů do vyráběného stroje.

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. Měření rozložení magnetického pole ve statorovém nebo rotorovém plechu je možné realizovat pomocí měření s magnetometrem využívajícím dvě jehly umístěnými od sebe ve vzdálenosti přibližně 10 mm a Hallovoú sondou, která je umístěná mezi nimi a měřit magnetické pole mezi místy magnetického obvodu, kam jsou zabodnuté tyto jehly [63–65]. Měření je díky tomu možné provádět v libovolném místě na statorovém plechu mezi zvolenými testovanými body.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 60034-2-1. *Točivé elektrické stroje – Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2015.
- [2] 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
- [3] IEEE 112-2017. *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2018.
- [4] 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.
- [5] PAVELKOVÁ, Naděžda. Nová legislativa motory a měniče EU MEPS. *Odborné časopisy* [online]. 2015. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2015/Energie_pro_budoucnost_XVI_57_MSV/01b_Pavelkova_EU_MEPS.pdf
- [6] APPINO, C., E. FERRARA, F. FIORILLO, L. ROCCHINO, C. RAGUSA, J. SIEVERT, T. BELGRAND, C. WANG, P. DENKE, S. SIEBERT, Y. NORGREN, 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
- [7] 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
- [8] ČSN EN 60404-2. *Magnetické materiály - Část 2: Metody měření magnetických vlastností ocelových tabulí a pásů pro elektrotechniku Epsteinovým přístrojem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2009.
- [9] BROŽ, Jaromír. *Základy fyzikálních měření*. 1. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1967.
- [10] 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.
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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
- [16] TONKOVIČ, Miroslav. *Analýza materiálu pro laserové řezání*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení

technické v Brně.

- [17] 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.
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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
- [24] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. Brno: VUTUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [25] *Computer controlled Remagraph-Remacomp-combination C-705/710 (Hysteresisgraph)*. 2011.
- [26] FIORILLO, Fausto. *Measurement and characterization of magnetic materials*. B.m.: Elsevier B.V., 2004. ISBN 978-0-12-257251-7.
- [27] *Computer controlled PERMAGRAPH C - 300 (Hysteresisgraph)*. 2008.
- [28] JIABIN WANG, Kais ATALLAH, R. CHIN, W M ARSHAD a H. LENDENMANN. Rotor Eddy-Current Loss in Permanent-Magnet Brushless AC Machines. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2010, **46**(7), 2701–2707. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2010.2042963
- [29] *Ansys Maxwell EM 16.0 online help*
- [30] WANG, Jiabin. Rotor eddy current losses in permanent magnet AC machines. 2011.
- [31] *Ansys Maxwell 2D user's guide* [online]. 2012 [vid. 2018-07-31]. Dostupné z: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D_V15.pdf
- [32] BASTOS, Joao Pedro a Nelson SADOWSKI. *Magnetic materials and 3D finite element modeling*. Boca Raton: CRC Press, 2014. ISBN 9781466592513.
- [33] MACH, Martin. *Analýza ztrát asynchronních motorů malého výkonu*. Brno, 2015. Vysoké učení technické.
- [34] HE, Youliang a Erik J. HILINSKI. Texture and magnetic properties of non-oriented electrical steels processed by an unconventional cold rolling scheme. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2016, **405**, 337–352. ISSN 03048853. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmmm.2015.12.057
- [35] 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
- [36] GHOSH, Pampa, Richard R. CHROMIK, Andrew M. KNIGHT a Shekhar G. WAKADE. Effect of metallurgical factors on the bulk magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism*

- and Magnetic Materials* [online]. 2014, **356**, 42–51. ISSN 03048853. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmmm.2013.12.052
- [37] *Remacomp C* [online]. [vid. 2018-07-19]. Dostupné z: <https://www.magnet-fysik.de/upload/18657996-4.pdf>
- [38] WANG, Jiayi, Qiang REN, Yan LUO a Lifeng ZHANG. Effect of non-metallic precipitates and grain size on core loss of non-oriented electrical silicon steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2018, **451**, 454–462. ISSN 03048853. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmmm.2017.11.072
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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
- [42] 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
- [43] Hirst Magnetic Instruments Ltd. *Fluxmeters* [online]. 2014 [vid. 2018-07-04]. Dostupné z: http://www.hirst-magnetics.com/instruments/flux_p4.shtml
- [44] 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>
- [45] *Acroni d.o.o* [online]. 2014 [vid. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.acroni.si/en/>
- [46] 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
- [47] 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
- [48] *Ansys Maxwell 3D user's guide* [online]. 2012 [vid. 2018-07-31]. Dostupné z: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V15.pdf
- [49] 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
- [50] *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
- [51] 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>
- [52] 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
- [53] ČSN EN 60404-4. *Magnetické materiály - Část 4: Metody měření stejnosměrných magnetických vlastností magneticky měkkých materiálů*. 1. Praha: Český normalizační institut. 2002.
- [54] HRUŠKA, Karel a Josef BRADÍK. *Vyjadřování nejistot výsledků měření*. 1997.
- [55] ČEJKA, Miloslav. *Stručný úvod do problematiky nejistot měření*. 2007.
- [56] HAVLÍKOVÁ, Marie a Soňa ŠEDIVÁ. *Měření v elektrotechnice - Laboratorní cvičení*. 2014.

-
- [57] STEINGROEVER, Erich a Gunnar ROSS. *Magnetic measuring techniques*. 2009.
- [58] TAKAHASHI, Norio a Daisuke MIYAGI. Effect of stress on iron loss of motor core. *2011 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2011* [online]. 2011, 469–474. Dostupné z: doi:10.1109/IEMDC.2011.5994642
- [59] MIYAGI, Daisuke, Kohei MIKI, Masanori NAKANO a Norio TAKAHASHI. Influence of compressive stress on magnetic properties of laminated electrical steel sheets. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2010, **46**(2), 318–321. ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2009.2033550
- [60] SENDA, Kunihiro, Akira FUJITA, Atsuhito HONDA, Naoki KUROKI a Masaaki YAGI. Magnetic properties and domain structure of nonoriented electrical steel under stress. *Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)* [online]. 2013, **182**(4), 10–18. ISSN 04247760. Dostupné z: doi:10.1002/eej.22320
- [61] ČSN EN 10106. *Plechý a pásy pro elektrotechniku, izotropní, válcované za studena, dodávané v tepelně zpracovaném stavu*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2017.
- [62] PELLEGRINO, Gianmario, Thomas M. JAHNS, Nicola BIANCHI, Wen SOONG a Francesco CUPERTINO. *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016. SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering. ISBN 978-3-319-32200-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-32202-5
- [63] SENDA, K., M. KUROSAWA, M. ISHIDA, M. KOMATSUBARA a T. YAMAGUCHI. Local magnetic properties in grain-oriented electrical steel measured by the modified needle probe method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2000, **215**, 136–139. ISSN 03048853. Dostupné z: doi:10.1016/S0304-8853(00)00096-2
- [64] PUGH, B. K., D. P. KRAMER a C. H. CHEN. Demagnetizing factors for various geometries precisely determined using 3-D electromagnetic field simulation. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2011, **47**(10), 4100–4103. ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2011.2157994
- [65] KUO, Shih Kang, Wen Chieh LEE, Sheng Yang LIN a Chen Yuan LU. The influence of cutting edge deformations on magnetic performance degradation of electrical steel. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2015, **51**(6). ISSN 00939994. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.2015.2440351
- [66] STONE, Greg C., Edward a. BOULTER, Ian CULBERT a Hussein DHIRANI. *Electrical Insulation for Rotating Machines* [online]. 2004. ISBN 0471445061. Dostupné z: doi:10.1002/047168290X
- [67] BS EN 42crmo4 Alloy Steel [online]. [vid. 2019-01-17]. Dostupné z: <https://www.astmsteel.com/product/42crmo4-alloy-steel/>
- [68] 41CrMo4 [online]. [vid. 2019-01-17]. Dostupné z: <https://www.steelgr.com/Steel-Grades/Carbon-Steel/41crmo4.html>

Autorovy publikace k tématu dizertační práce

Impaktovaný časopis

- [A1] BULÍN, T.; ONDRŮŠEK, Č.; HAPLA, M.; SCHNEEWEISS, O.; ŠVÁBENSKÁ, E. Magnetic Properties and Structure of Non- Oriented Electrical Steel Sheets after Different Shape Processing. *ACTA PHYSICA POLONICA A*, 2017, roč. 131, č. 4, s. 819-821. ISSN: 1898-794X.

Konference

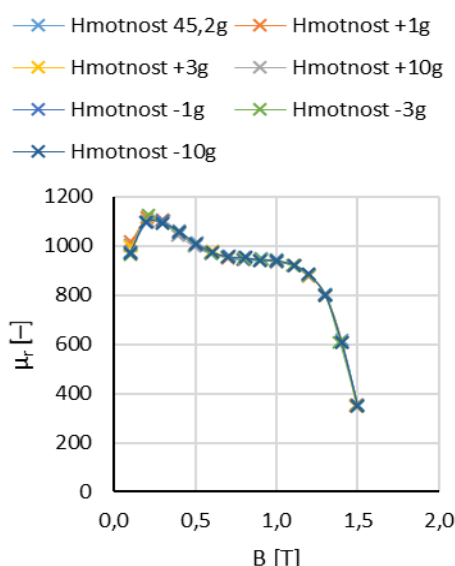
- [A2] BULÍN, T.; ROUPCOVÁ, P.; ONDRŮŠEK, Č.; SCHNEEWEISS, O.; HAPLA, M. Magnetic and Transport properties of 41CrMo4 Steel. In *24th International Conference on Metallurgy and Materials*. Conference proceedings. Ostrava: TANGER Ltd., 2015. s. 621-625. ISBN: 978-80-87294-62- 8.
- [A3] BULÍN, T. Measurement of magnetic material. In *Proceedings of the 21st Conference STUDENT EEICT 2015*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. s. 600-604. ISBN: 978-80-214-5148- 3.
- [A4] BULÍN, T.; ONDRŮŠEK, Č. Magnetic measurement of lamination punched with the press. In *Advanced Mechatronics Solutions. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland, 2015. s. 441-446. ISBN: 978-3-319-23921- 7. ISSN: 2194- 5357.
- [A5] BULÍN, T. Problems with magnetic measurement of 41CrMo4 steel. In *Proceedings of the 22nd Conference STUDENT EEICT 2016*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. s. 502-506. ISBN: 978-80-214-5350- 0.
- [A6] BULÍN, T.; ONDRŮŠEK, Č.; SCHNEEWEISS, O.; HAPLA, M.; ŠVÁBENSKÁ, E.; ROUPCOVÁ, P. Magnetic properties of 42CrMo4 steel. In *Conference proceedings*. 1st. Ostrava: Tanger Ltd., 2016. s. 41-41. ISBN: 978-80-87294-69- 7.
- [A7] BULÍN, T.; ŠVÁBENSKÁ, E.; ONDRŮŠEK, Č.; HAPLA, M.; SCHNEEWEISS, O. Influence of laser cutting and punching on magnetic properties of electrical steel M470- 50A. In *Metal 2016 Conference proceedings*. 1st. Ostrava: TANGER Ltd., 2016. s. 670-676. ISBN: 978-80-87294-67- 3.
- [A8] BULÍN, T.; ONDRŮŠEK, Č. Magnetic Measurements of Solid Material. In *Mechatronics 2017 Recent Technological and Scientific Advances. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 1. Springer International Publishing AG 2018, 2017. s. 281-288. ISBN: 978-3-319-65959- 6. ISSN: 2194-5357.
- [A9] BULÍN, T.; ONDRŮŠEK, Č.; ŠVÁBENSKÁ, E.; HAPLA, M.; SCHNEEWEISS, O. Changes in Electrical Steel Sheets Induced by Heat Treatment. In *METAL 2017 Conference Proceedings*. 1st Edition 2018. Ostrava: Tanger Ltd., 2018. s. 743-748. ISBN: 978-80-87294-79-6.
- [A10] BULIN, T, P ROUPCOVA, C ONDRUSEK a O SCHNEEWEISS. Analysis of stresses in FeSi sheets induced by laser cutting [online]. 2018, 1–6. ISSN 1757899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/461/1/012009

Autorovy publikace mimo téma dizertační práce

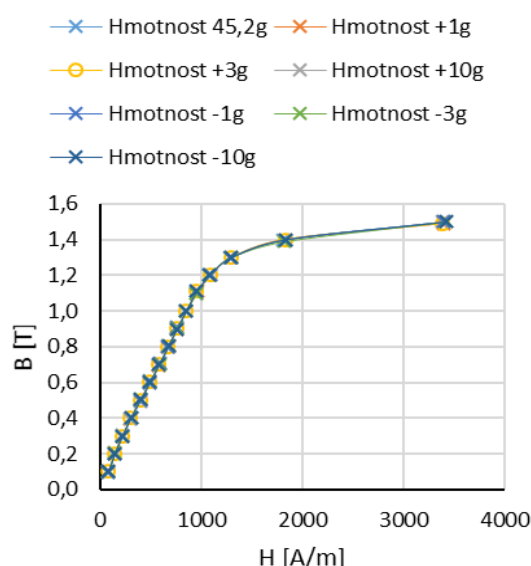
- [A10] BULÍN, T.; ONDRŮŠEK, Č.; HUZLÍK, R. Zařízení pro diagnostiku asynchronních motorů. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2016, roč. 18, č. 2, s. 51-62. ISSN: 1213-1539.

PŘÍLOHA A – CHYBNĚ ZADANÉ VSTUPNÍ PARAMETRY

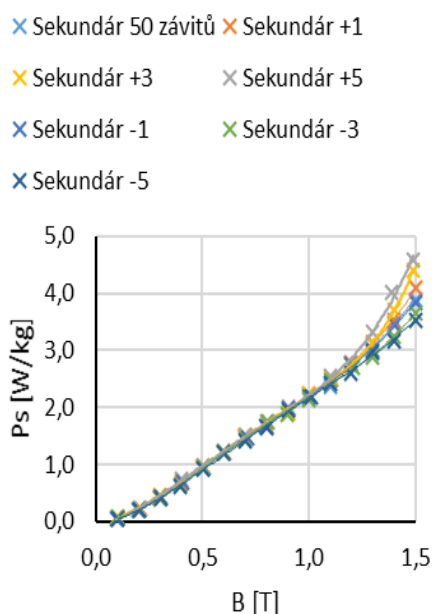
Pro jeden reálně připravený vzorek byly fiktivně upravovány vstupní parametry pro měření a sledována změna výsledných změřených charakteristik. Tímto byla provedena simulace chybně zadaných vstupních dat.



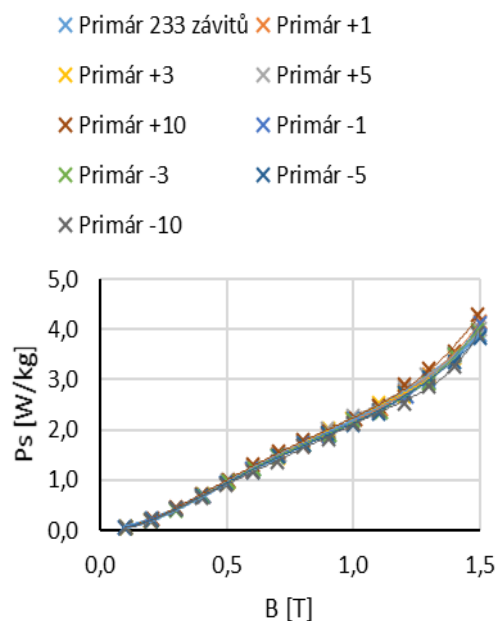
Obr. A. 1 Relativní permeabilita pro rozdílnou, chybně zadanou hmotnost u stejného vzorku (50 Hz)



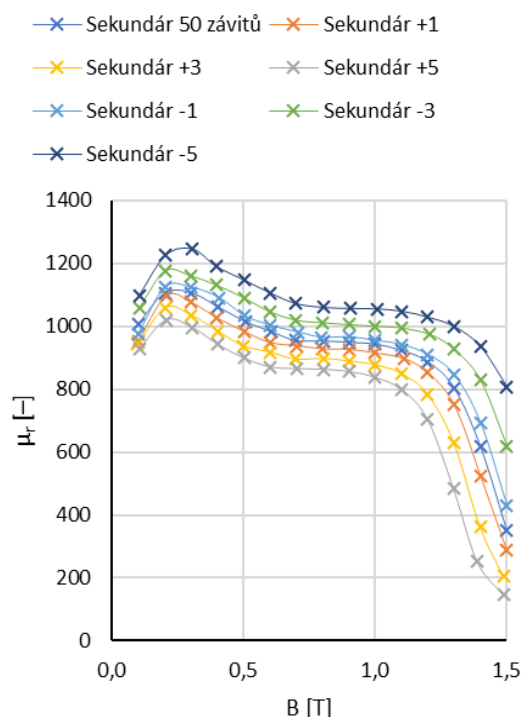
Obr. A. 2 Magnetizační křivky pro rozdílnou, chybně zadanou hmotnost u stejného vzorku (50 Hz)



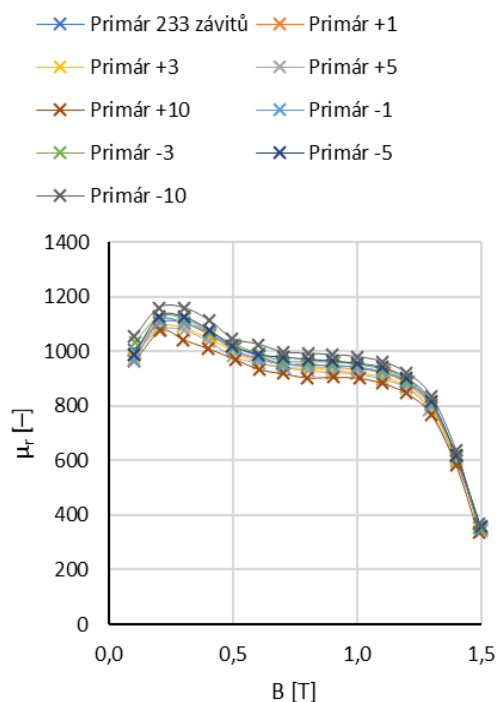
Obr. A. 3 Celkové magnetické ztráty pro rozdílný počet sekundárních závitů (50 Hz)



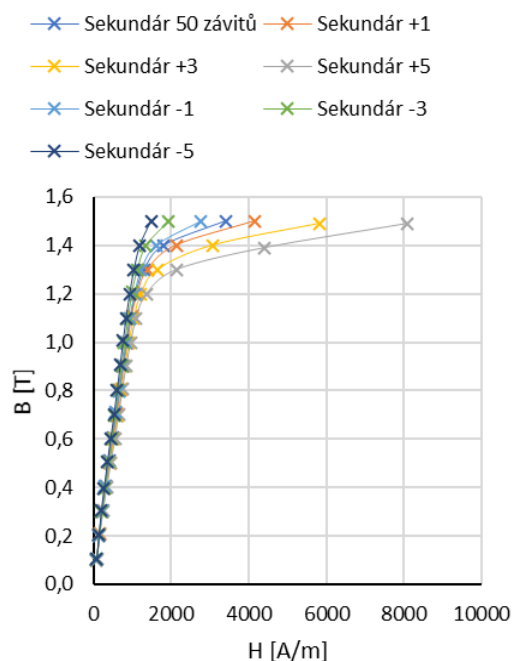
Obr. A. 4 Celkové magnetické ztráty pro rozdílný počet primárních závitů (50 Hz)



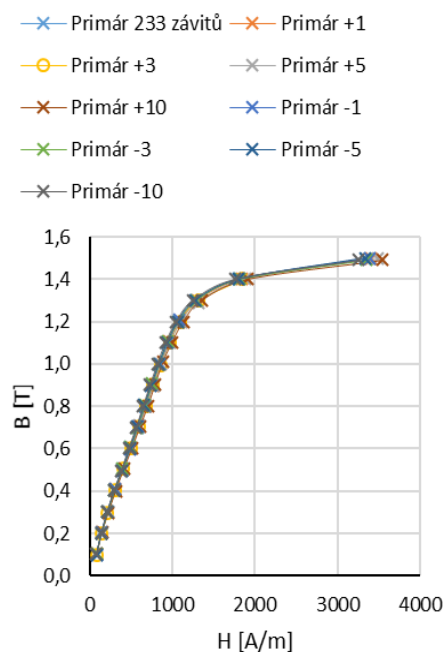
Obr. A. 5 Relativní permeabilita pro rozdílný počet sekundárních závitů (50 Hz)



Obr. A. 6 Relativní permeabilita pro rozdílný počet primárních závitů (50 Hz)

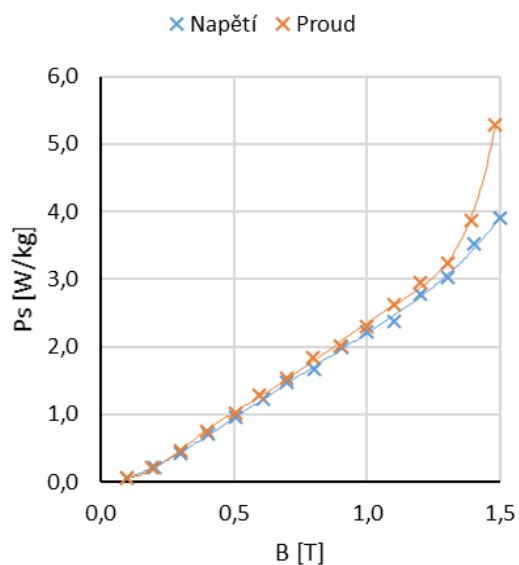


Obr. A. 7 Magnetizační křivky pro rozdílný počet sekundárních závitů (50 Hz)

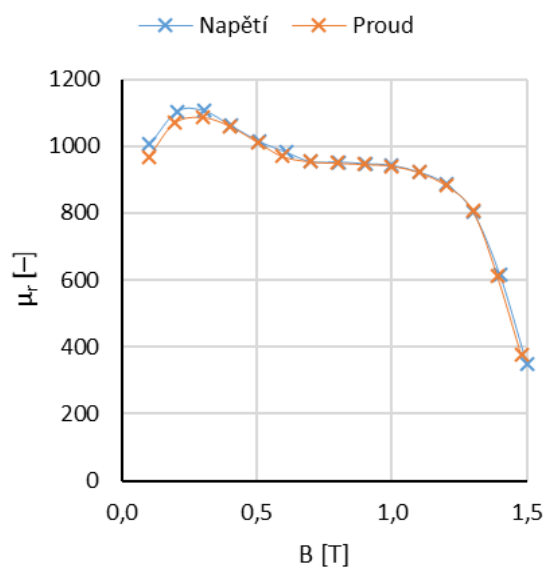


Obr. A. 8 Magnetizační křivky pro rozdílný počet primárních závitů (50 Hz)

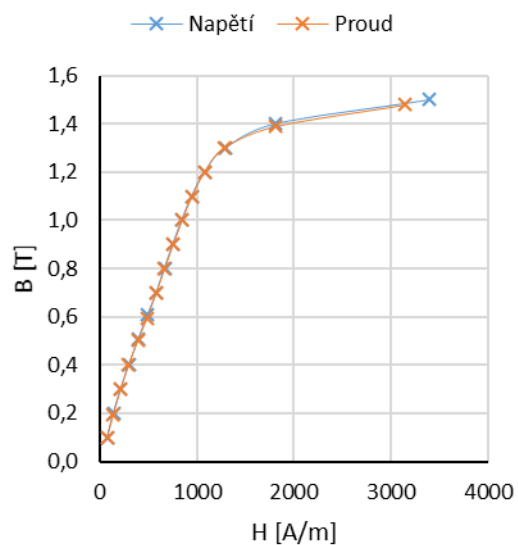
Srovnání výsledných změřených charakteristik při použití napájecího napětového a proudového zdroje



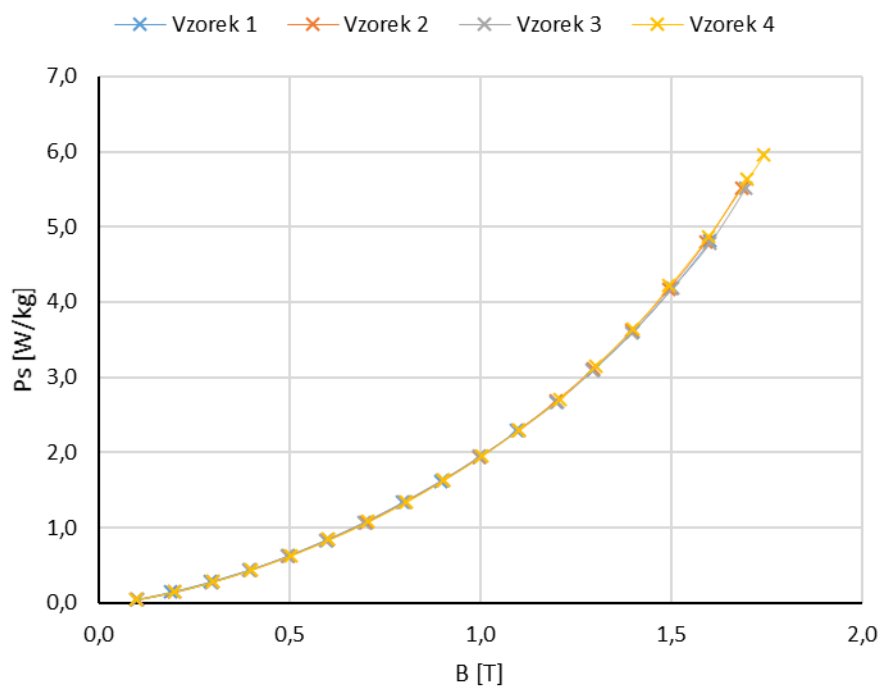
Obr. A. 9 Celkové magnetické ztráty pro napěťový a proudový zdroj (50 Hz)



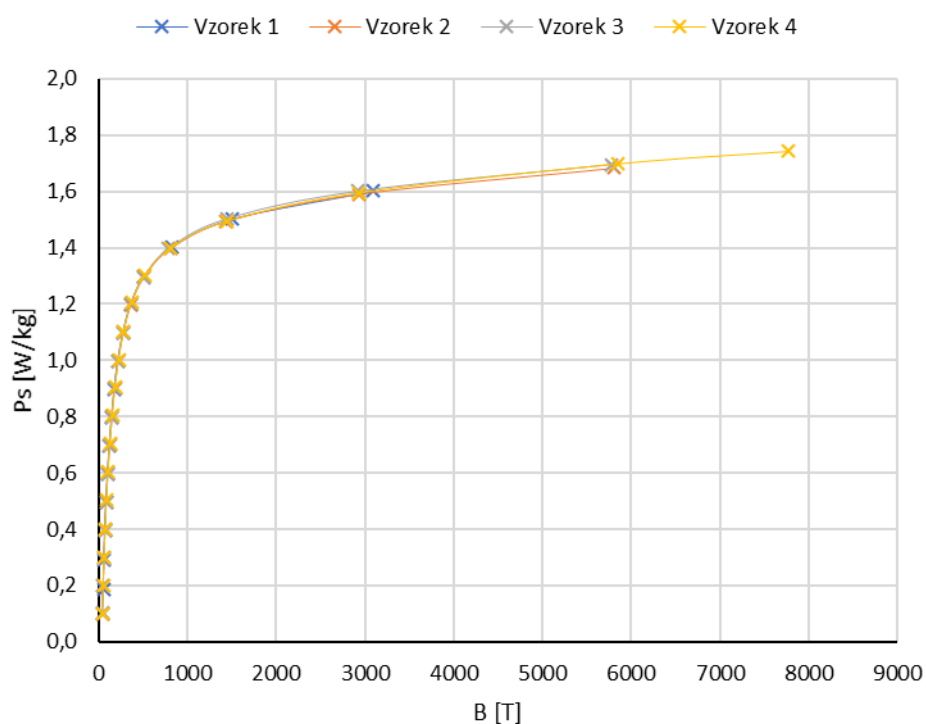
Obr. A. 10 Relativní permeabilita pro napěťový a proudový zdroj (50 Hz)



Obr. A. 11 Magnetizační křivky pro napěťový a proudový zdroj (50 Hz)

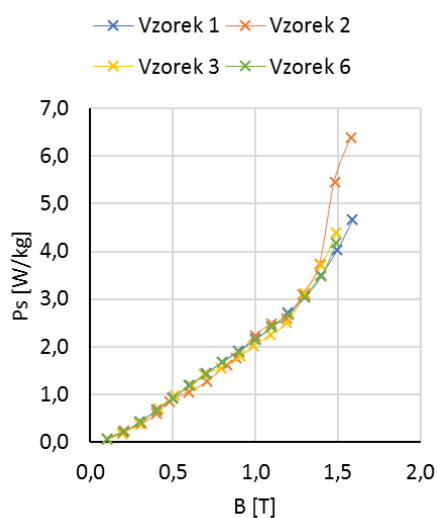


Obr. A. 12 Velikost ztrát pro opakované měření stejného vzorku po několika měsících (50 Hz)

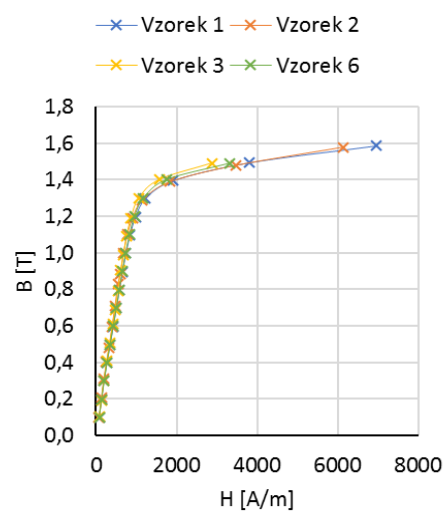


Obr. A. 13 Magnetizační křivka pro opakované měření stejného vzorku po několika měsících (50 Hz)

Vliv velikosti průřezu na magnetické vlastnosti



Obr. A. 14 Závislost celkových magnetických ztrát na velikosti magnetické indukce na 50 Hz

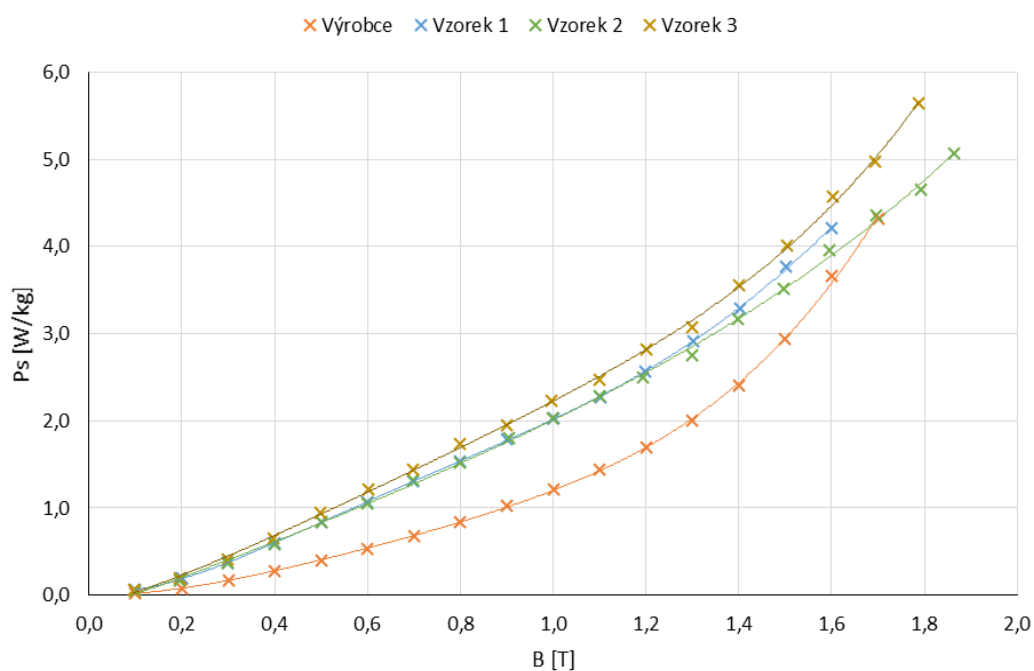


Obr. A. 15 Magnetizační křivka na 50 Hz

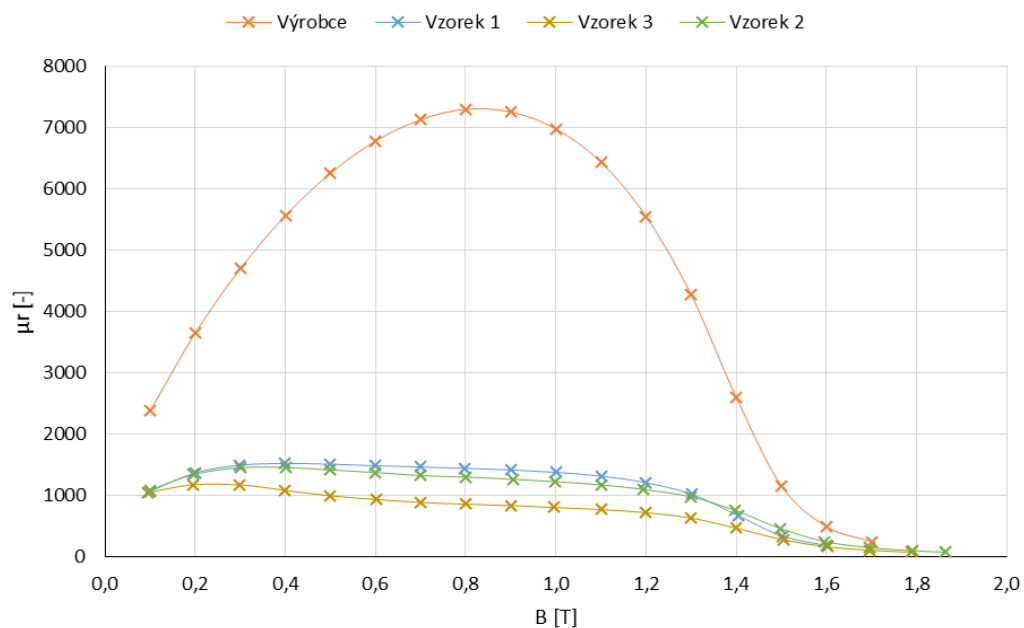
PŘÍLOHA B – SROVNÁNÍ RŮZNÝCH VELIKOSTÍ VZORKŮ

Tabulka B. 1 Parametry testovaných vzorků materiálu M330-35A

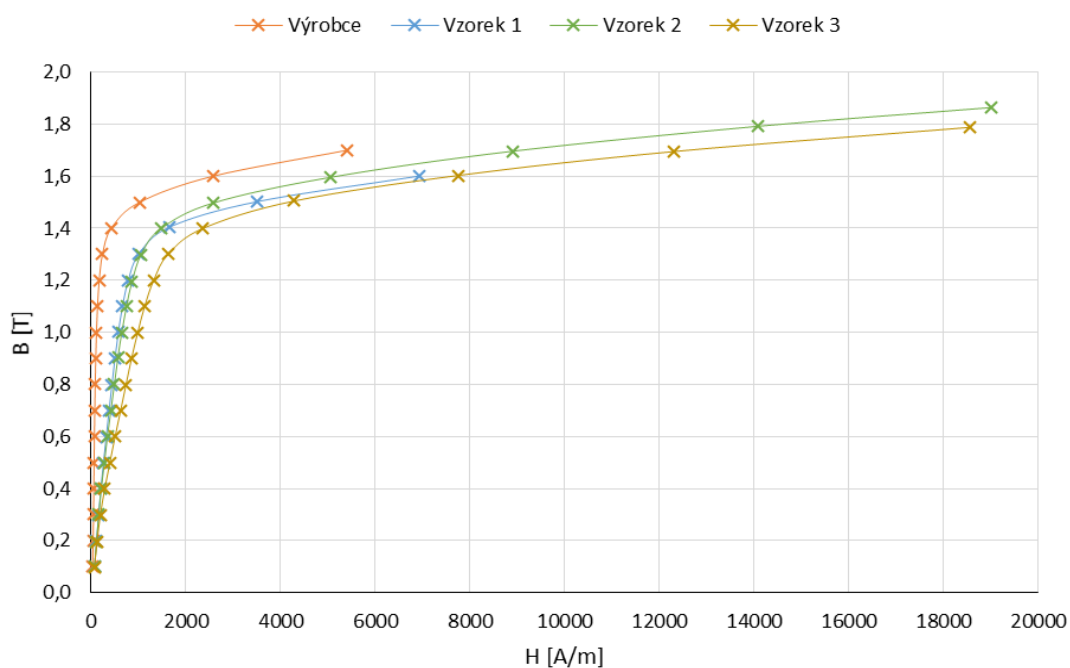
M330-35A	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	
Vnější průměr vzorku	120	143	88	mm
Vnitřní průměr vzorku	104,8	130	79,7	mm
Výška vzorku	7,7	6,5	4,2	mm
Délka magnetického obvodu	353,1	428,8	263,4	mm
Průřez magnetického obvodu	58,5	42,3	17,4	mm ²
Hmotnost	150,4	135,2	32,8	g
Primární vinutí	240	578	375	závitů
Sekundární vinutí	50	20	20	závitů



Obr. B. 1 M330-35A Srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno)



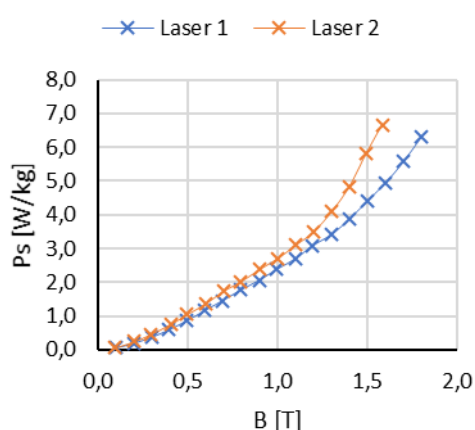
Obr. B. 2 M330-35A Srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno)



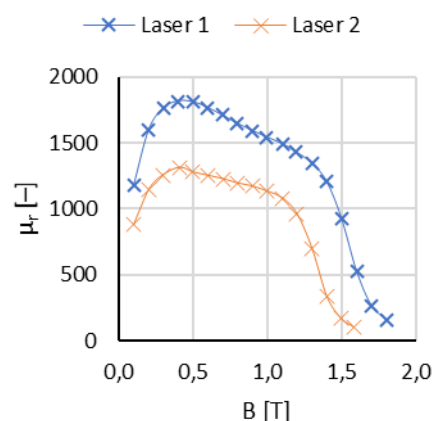
Obr. B. 3 M330-35A Srovnání různých vzorků při frekvenci 50 Hz (laserováno)

Tabulka B. 2 Parametry testovaných vzorků materiálu M470-50A

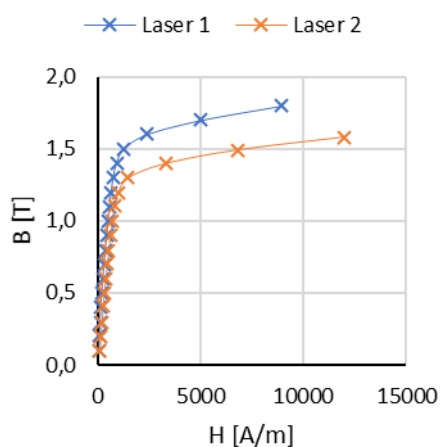
Parametry vzorků	Laser 1	Laser 2	
Vnější průměr	120	120	mm
Vnitřní průměr	105	106	mm
Výška vzorku	7,5	7	mm
Průřez magnetického obvodu	56,3	49	mm ²
Hmotnost	158	127,5	g
Primární vinutí	243	353	
Sekundární vinutí	50	50	



Obr. B. 4 Celkové magnetické ztráty M470-50A při 50Hz



Obr. B. 5 Relativní permeabilita M470-50A při 50Hz

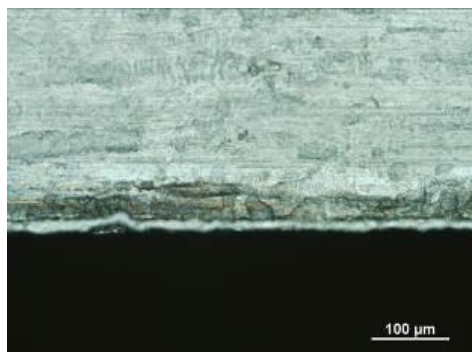


Obr. B. 6 Magnetizační křivka při 50 Hz M470-50A

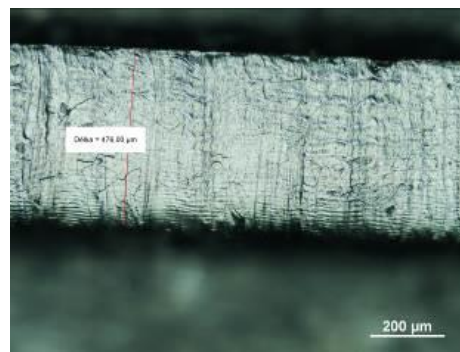
PŘÍLOHA C – VODA, LASER, LIS, JISKRA

Tabulka C. 1 Testované vzorky – geometrické rozměry a další parametry testovaných vzorků M470-50A

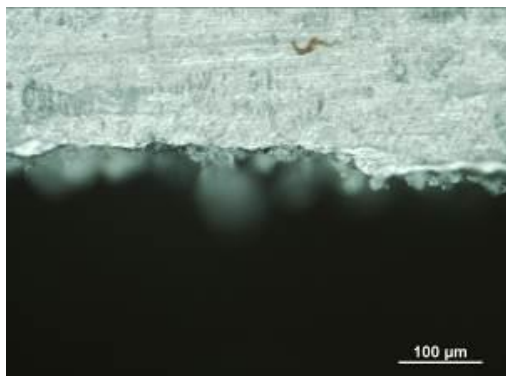
Parametry vzorků	Laser 1	Laser 1.1	Lis 2	Jiskra 3.2	Jiskra 4.1	Jiskra 4.1.1	Voda 5	
Vnější průměr	120	119,4	120	80	80	79,9	120	mm
Vnitřní průměr	105	105,4	105	70	70	69,95	106	mm
Výška vzorku	7,5	7,5	7,5	5	5	5	7	mm
Délka mag. obvodu	353,4	353,1	353,4	235,6	235,6	235,4	355,0	mm
Průřez mag. obvodu	56,3	52,5	56,3	25	25	24,9	49	mm ²
Objem toroidu	1,99E-02	1,85E-02	1,99E-02	5,89E-03	5,89E-03	5,86E-03	1,74E-02	m ³
Hmotnost	158	145,1	154,5	45,5	45,6	45,3	126,5	g
Primární vinutí	243	246	248	162	164	173	244	
Sekundární vinutí	50	50	50	40	40	40	50	
Poměr průměrů	1,14	1,13	1,14	1,14	1,14	1,14	1,13	



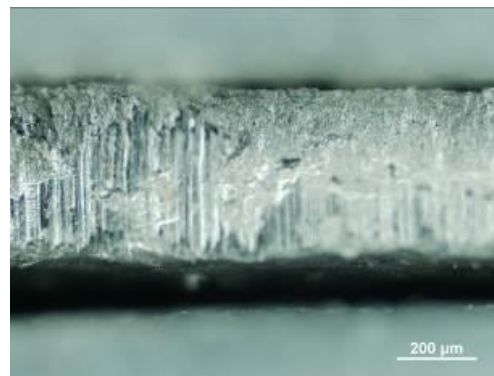
Obr. C. 1 Hrana plechu M470-50A řezaného laserem (horní pohled)



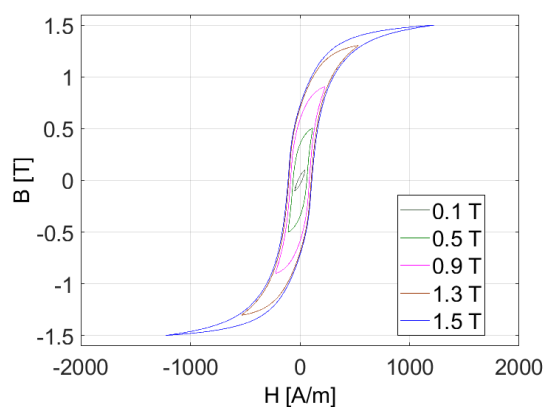
Obr. C. 2 Hrana plechu M470-50A řezaného laserem (boční pohled)



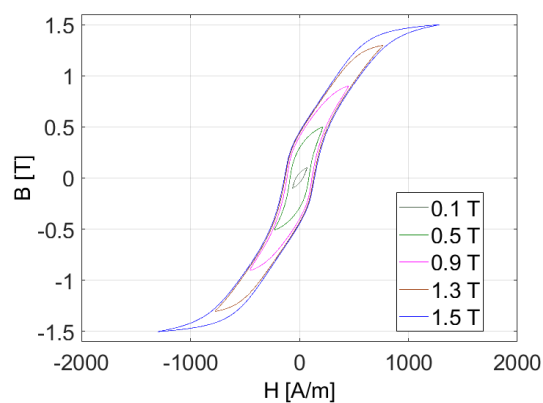
Obr. C. 3 Hrana plechu M470-50A raženého lisem (horní pohled)



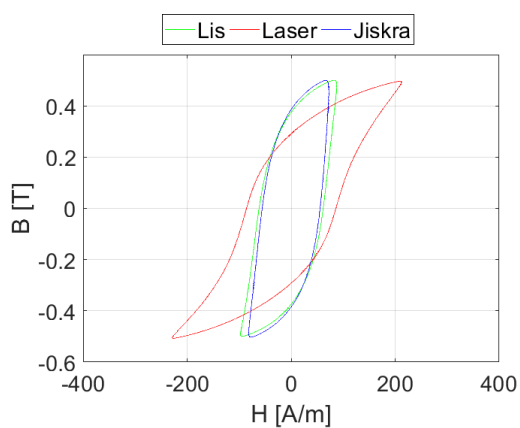
Obr. C. 4 Hrana plechu M470-50A raženého lisem (boční pohled)



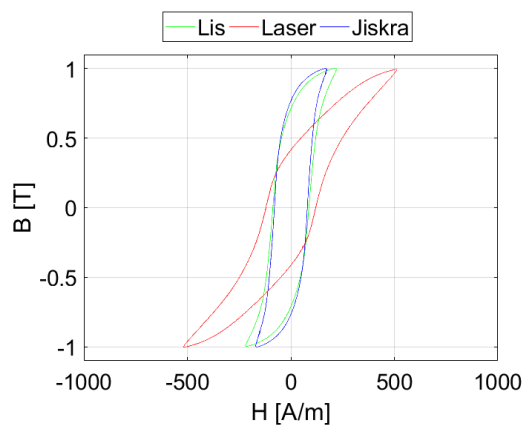
Obr. C. 5 BH křivka pro různé sycení plechů ražených lisem 50 Hz, 1,5T, M470-50A



Obr. C. 6 BH křivka pro různé sycení plechů ražených laserem 50 Hz, 1,5T, M470-50A



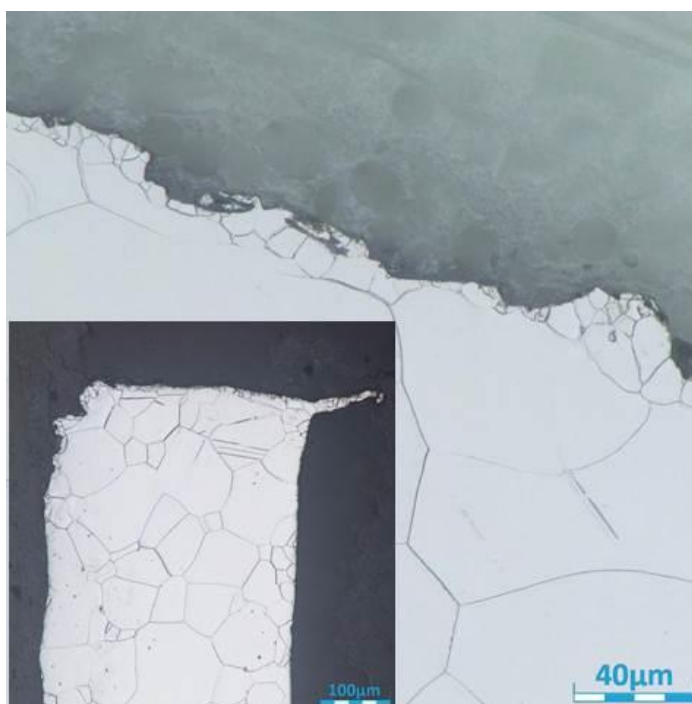
Obr. C. 7 BH křivka pro 50 Hz, 0,5T, M470-50A



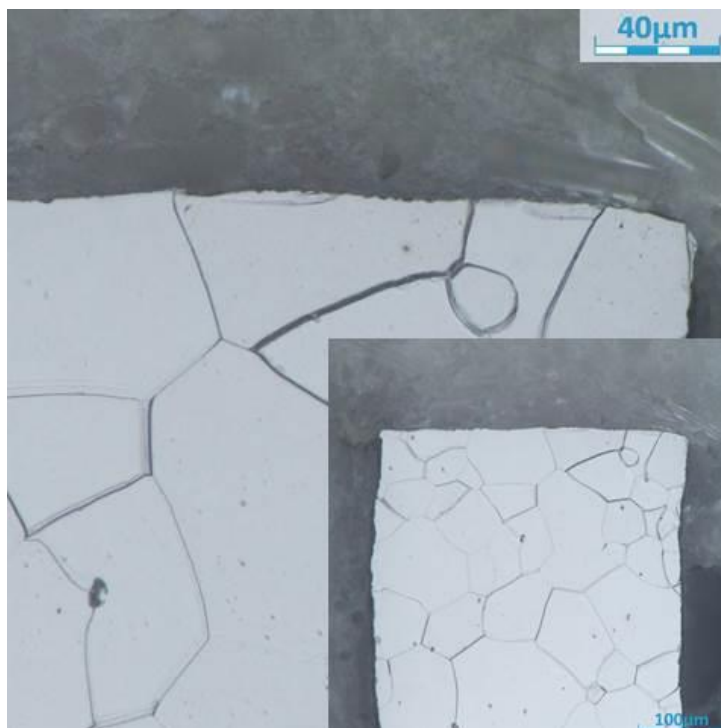
Obr. C. 8 BH křivka pro 50 Hz, 1,0T, M470-50A

Tabulka C. 2 Parametry testovaných vzorků M330-35A

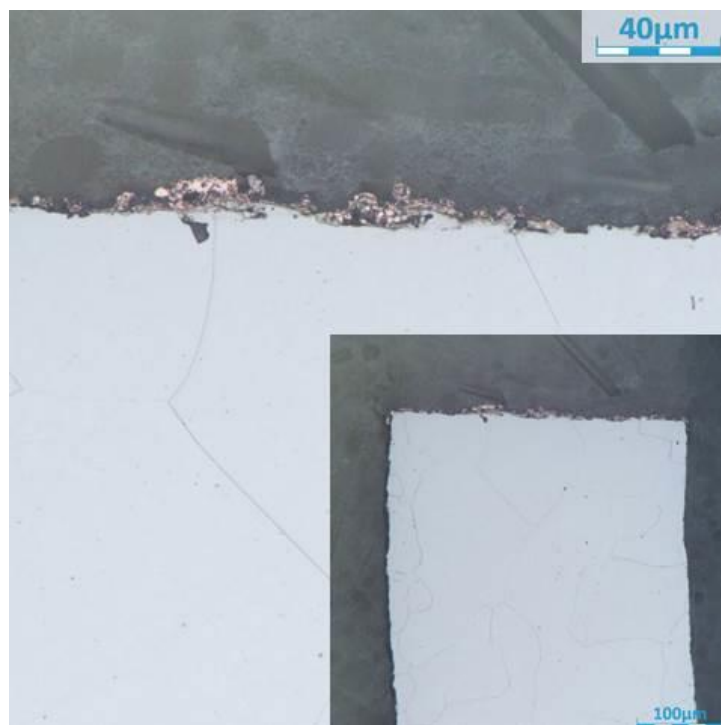
Parametry vzorků	Vzorek 1	Vzorek 1.1	Vzorek 1.2	Vzorek 1.3	Vzorek 2	Vzorek 3	
	Laser	Laser	Laser	Laser	Voda	Jiskra	
Vnější průměr	120	100	100	100	100	100	mm
Vnitřní průměr	104	84	84	84	84	84	mm
Výška vzorku	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	mm
Hmotnost	172,4	140,9	141,2	141,8	139,7	141,6	g
Primární vinutí	335	271	279	271	261	274	
Sekundární vinutí	50	50	50	50	50	50	



Obr. C. 9 M330-35A řezáno vodním paprskem, (OM, zvětšení 500x, 1200x)



Obr. C. 10 M330-35A řezáno laserem, (OM, zvětšení 600x, 1200x)



Obr. C. 11 M330-35A řezáno elektrojiskrově, (OM, zvětšeno 600x, 1200x)

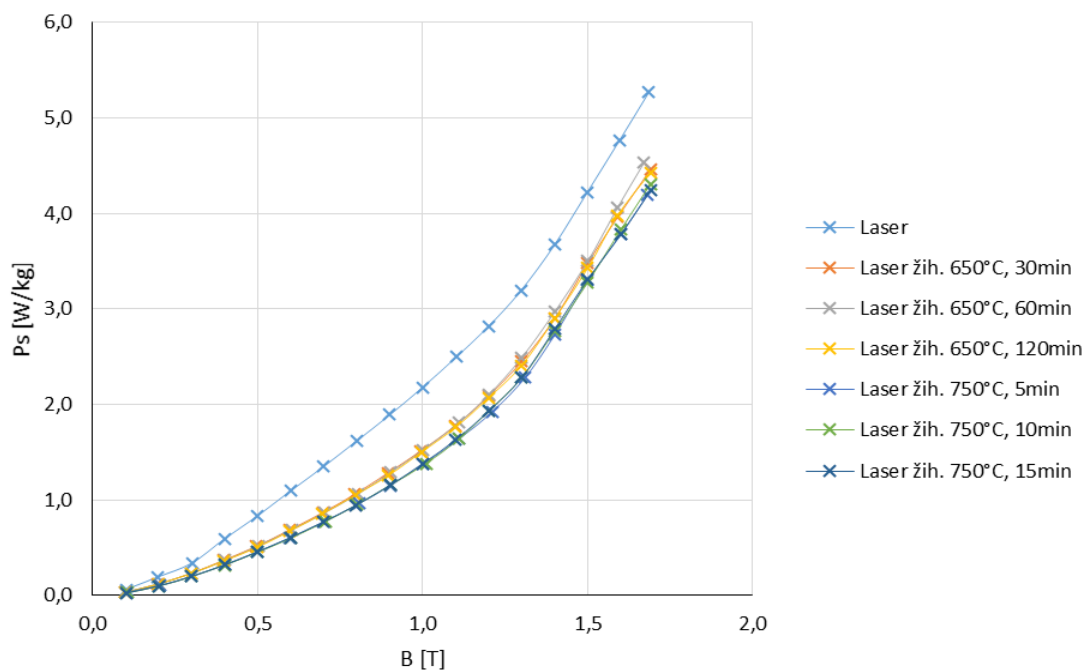
PŘÍLOHA D – ŽIHÁNÍ

Tabulka D. 1 Parametry vzorků po žihání ve vakuu

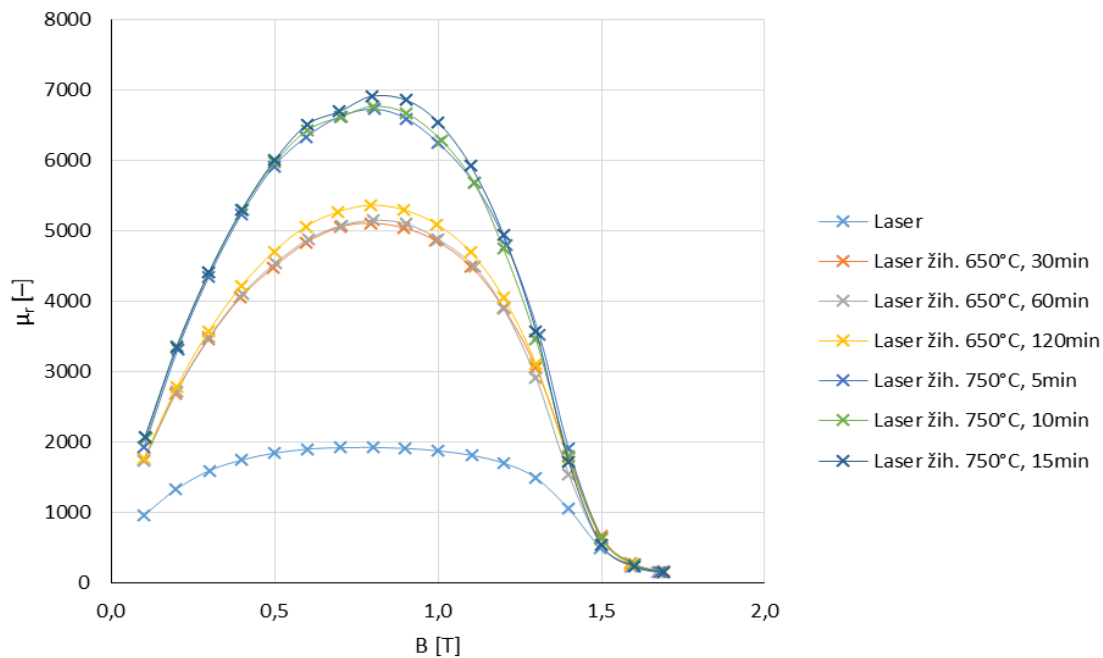
Parametry vzorků	Vzorek 1			Vzorek 2			Vzorek 3			
	Laser	Voda	Jiskra	Laser	Voda	Jiskra	Laser	Voda	Jiskra	
Vnější průměr	100	100	100	100	100	100	100	100	100	mm
Vnitřní průměr	84	84	84	84	84	84	84	84	84	mm
Výška vzorku	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	mm
Hmotnost	141,8	139,3	141,2	141,6	139,9	140,8	141,8	139,9	141,3	g
Primární vinutí	280	279	266	274	277	278	275	282	280	
Sekundární vinutí	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Teplota žihání	650	650	650	650	650	650	650	650	650	°C
Délka žihání	30	30	30	60	60	60	120	120	120	min

Tabulka D. 2 Parametry vzorků po žihání ve vakuu

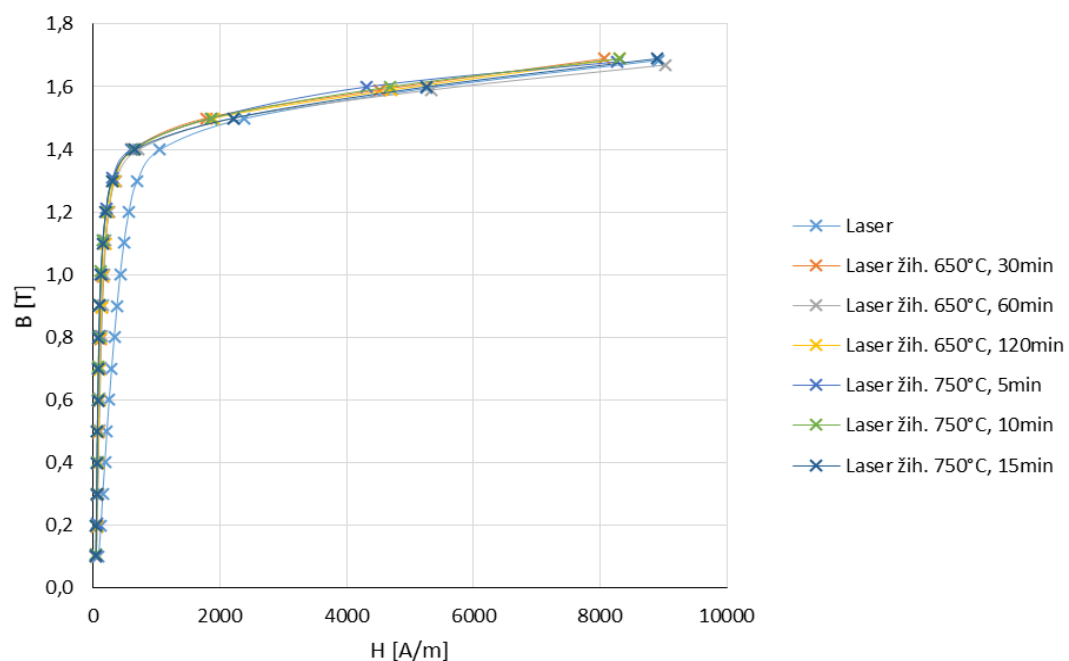
Parametry vzorků	Vzorek 4			Vzorek 5			Vzorek 6			
	Laser	Voda	Jiskra	Laser	Voda	Jiskra	Laser	Voda	Jiskra	
Vnější průměr	100	100	100	100	100	100	100	100	100	mm
Vnitřní průměr	84	84	84	84	84	84	84	84	84	mm
Výška vzorku	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	mm
Hmotnost	141,6	140	141,3	141,2	139,9	141	140,6	138,9	141,4	g
Primární vinutí	285	281	271	284	280	284	275	273	274	
Sekundární vinutí	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Teplota žihání	750	750	750	750	750	750	750	750	750	°C
Délka žihání	5	5	5	10	10	10	15	15	15	min



Obr. D. 1 M330-35A – Celkové magnetické ztráty při 50 Hz - laser



Obr. D. 2 M330-35A – Velikost relativní permeability při 50 Hz - laser



Obr. D. 3 M330-35A – Magnetizační křivky při 50 Hz - laser

PŘÍLOHA E – POŠKOZENÍ IZOLACE VLIVEM TEPLoty

Tabulka E. 1 Částečný seznam standardních izolačních povlaků pro elektrotechnickou ocel určených podle ASTM A976-1997 [66]

C-0	Ocel má přirozenou ochranu povrchu oxidem železnatým
C-2	Anorganický povlak oxidu hořečnatého a křemičitanů, které reagují s povrchem oceli při vysokoteplotním žíhání. Převážně se používá na výrobu jader distribučních transformátorů. Nevýhodné použití je ovšem pro jakékoliv ražení díky abrazivitě povlaku.
C-3	Smalt nebo lak, který umožňuje lehkou razitelnost a je odolný normálním provozním teplotám. Není vhodný pro žíhání na uvolnění napětí v materiálu.
C-3A	Stejný materiál jako C-3, ale nanesen v tenčí vrstvě, která usnadňuje sváření rotorů a statorů a minimalizuje zbytky sváření
C-4	Nepřilnavé zpracování, které poskytuje ochranu plechů proti slepení během žíhání v polozpracovaném stavu.
C-5	Izolace se anorganického složení a obsahuje fosforečnan hlinitý. C-5 je používána pro svůj vysoký povrchový odpor ve svazku plechů. Ochranný povlak vydrží žíhání na uvolnění napětí.
C-5A	Stejný povlak jako C-5 ale v tenčí variantě, která usnadňuje sváření rotorů a statoru pro snížení zbytků po sváření.
C-6	Kombinovaná izolace organická/anorganická, která odolá žíhání na uvolnění napětí.

Tabulka E. 2 Parametry testovaných vzorků M330-35A

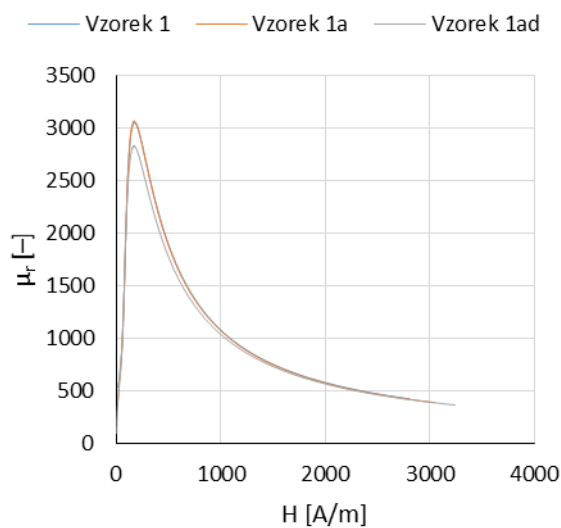
Vzorek	1	1a	1ad	2	2a	2.1	2.1a	
Vnější průměr	30	30	30	365	365	365	365	mm
Vnitřní průměr	26	26	26	334	334	334	334	mm
Tloušťka	2.6	2.6	2.6	4.7	4.7	0.5	0.5	mm
Hmotnost	3,33	3,35	3,35	653	653	72,5	72,6	g
Primární vinutí	60	60	64	442	448	540	584	Závitů
Sekundární vinutí	40	40	40	50	50	50	50	Závitů



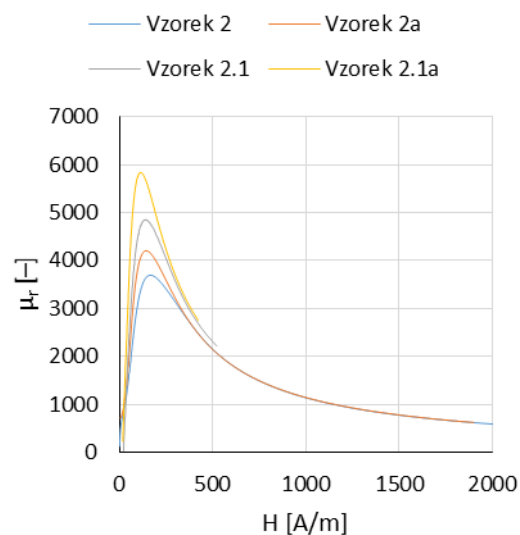
Obr. E. 1 Vzorek 1 detail



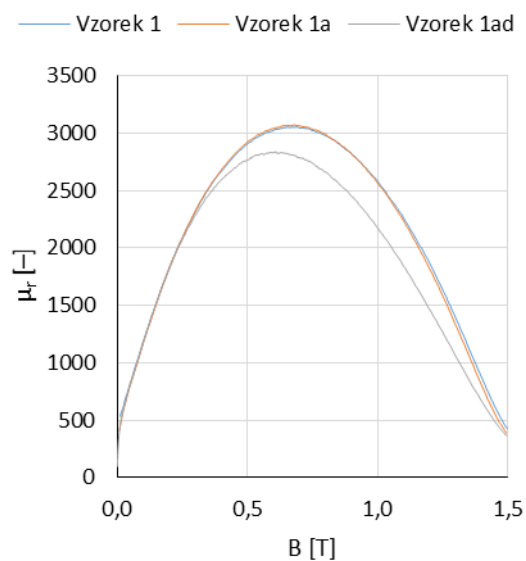
Obr. E. 2 Vzorek 1a detail



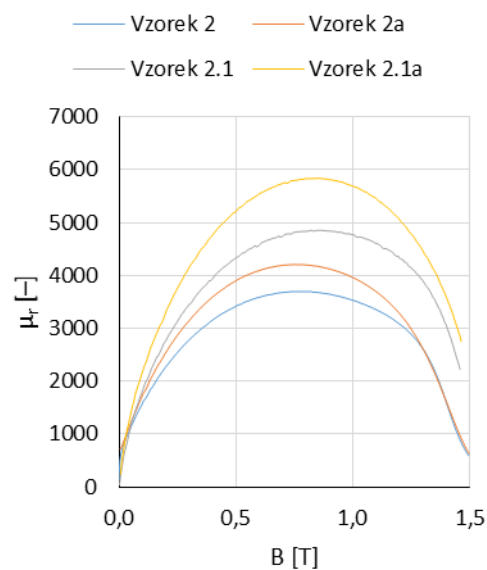
Obr. E. 3 Kvazistatické měření permeability pro malé vzorky v závislosti na intenzitě magnetického pole



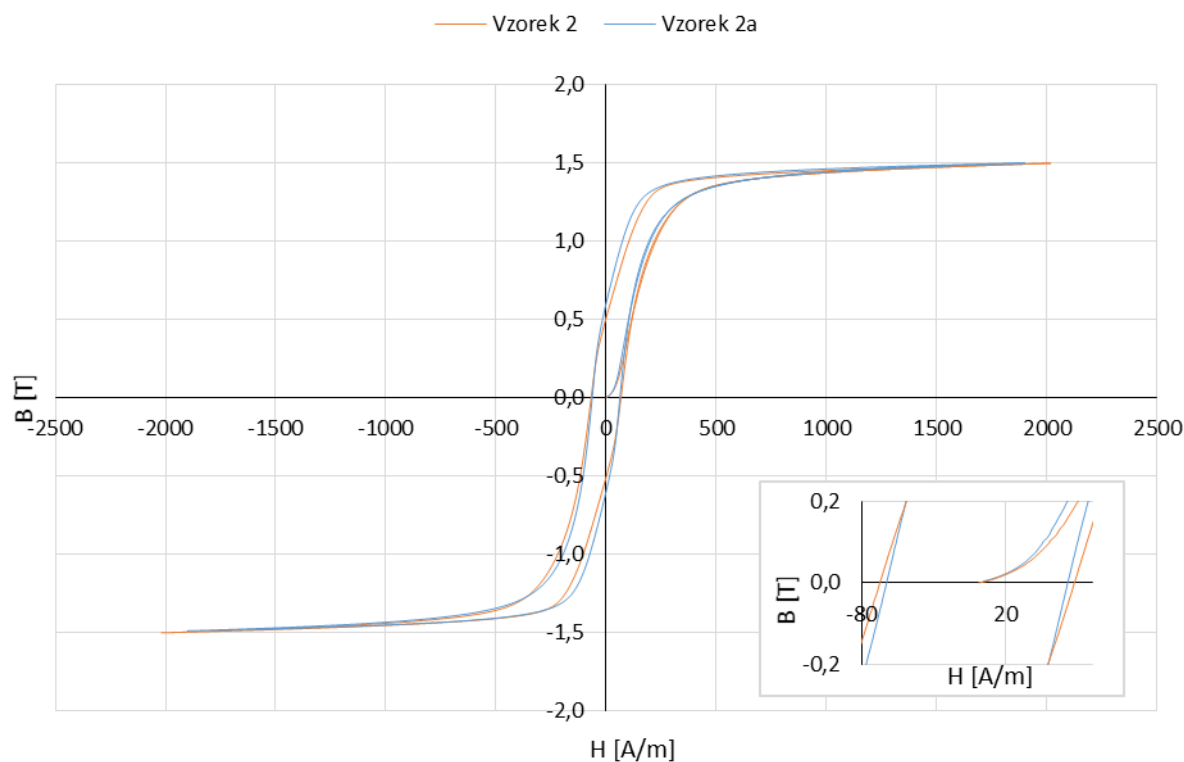
Obr. E. 4 Kvazistatické měření permeability pro velké vzorky v závislosti na intenzitě magnetického pole



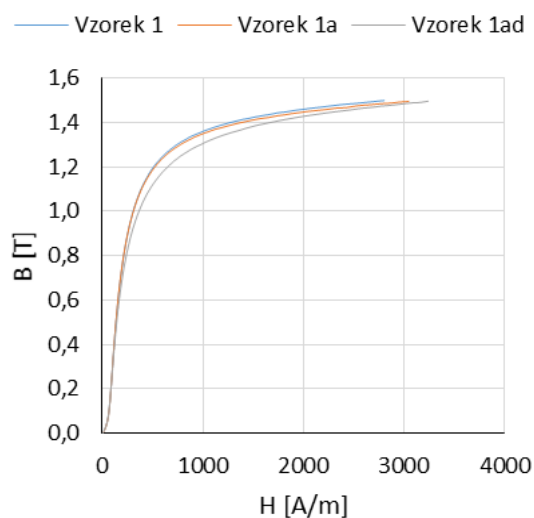
Obr. E. 5 Kvazistatické měření permeability pro malé vzorky v závislosti na magnetické indukci



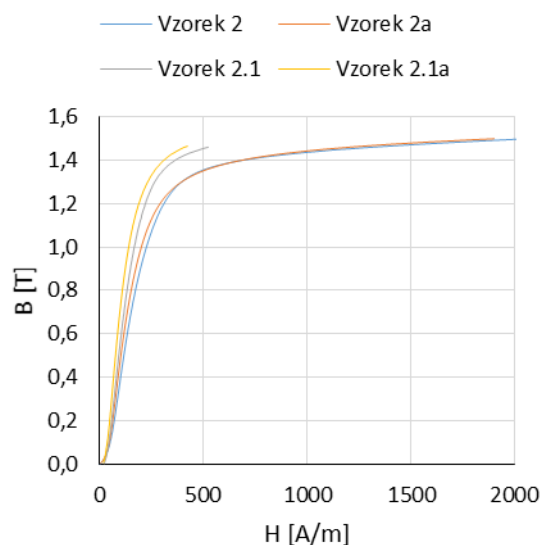
Obr. E. 6 Kvazistatické měření permeability pro velké vzorky v závislosti na magnetické indukci



Obr. E. 7 Kvazistatické hysterezní křivky pro velké vzorky



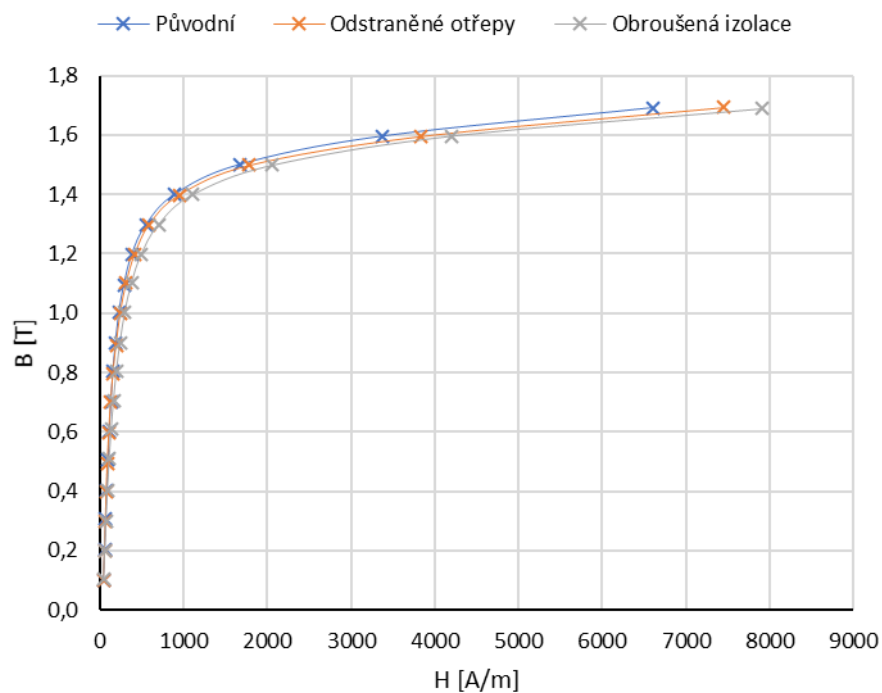
Obr. E. 8 Kvizistatické měření magnetizační křivky pro malé vzorky



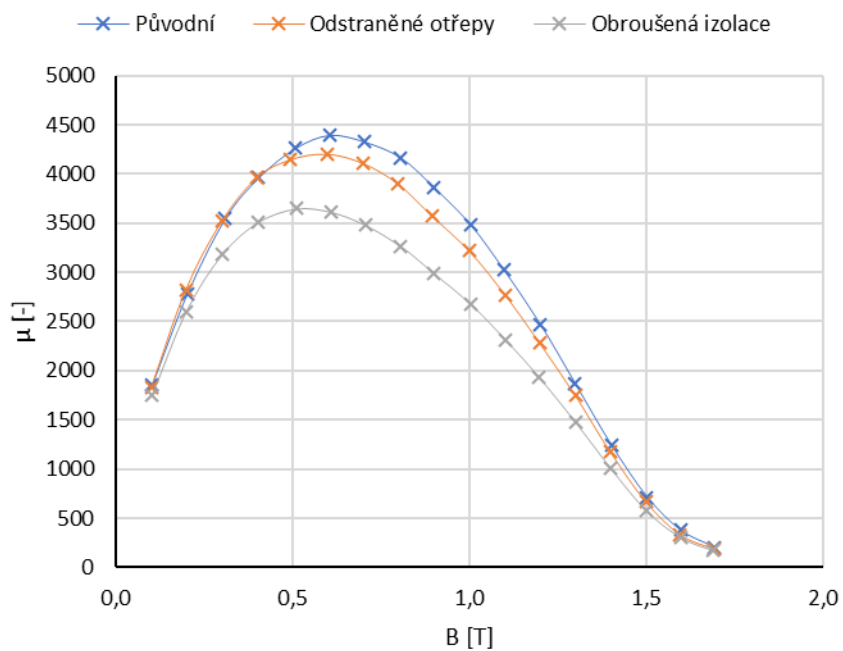
Obr. E. 9 Kvizistatické měření magnetizační křivky pro velké vzorky

Tabulka E. 3 Parametry testovaných vzorků M470-50A

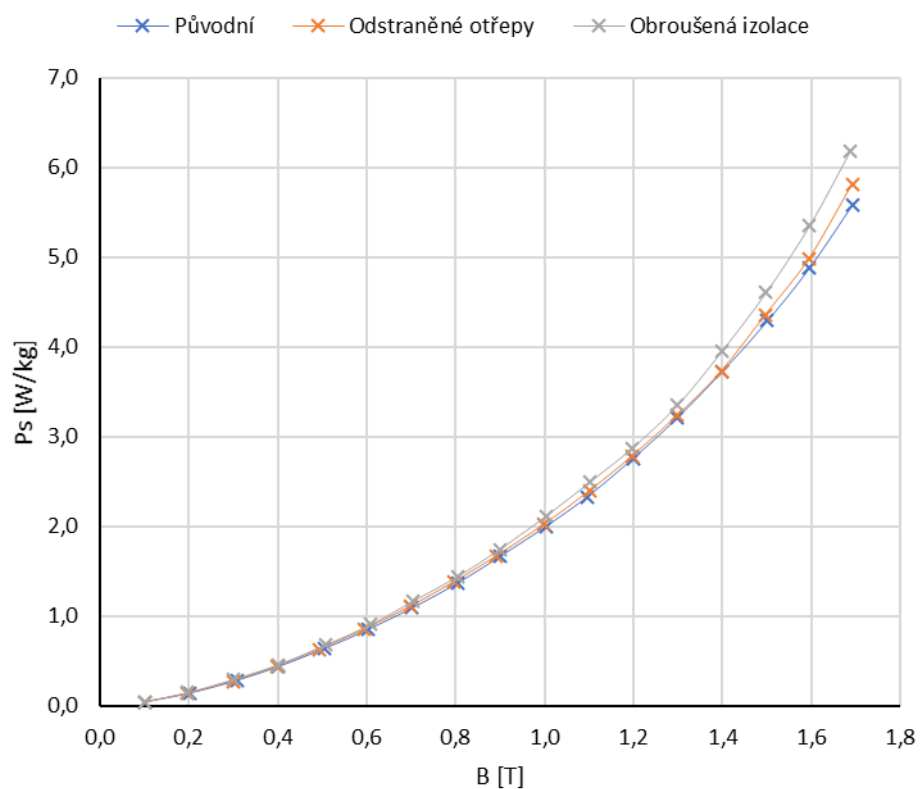
Vzorek	Původní	Odstraněné otřepy	Odstraněná izolace	
Vnější průměr	120	120	120	mm
Vnitřní průměr	105	105	105	mm
Tloušťka	7,6	7,6	7,6	mm
Hmotnost	154,4	154,4	154,4	g
Primární vinutí	259	246	238	Závitů
Sekundární vinutí	50	50	50	Závitů



Obr. E. 10 Magnetizační křivka při 50 Hz, materiál M470-50A



Obr. E. 11 Závislost relativní permeability při 50 Hz, materiál M470-50A



Obr. E. 12 Závislost celkových magnetických ztrát na sycení při 50Hz, materiál M470-50A

PŘÍLOHA F – PLNÝ MATERIÁL 42CrMo4 A 41CrMo4

Tabulka F. 1 Chemické složení 42CrMo4 podle hmotnostních procentech [67]

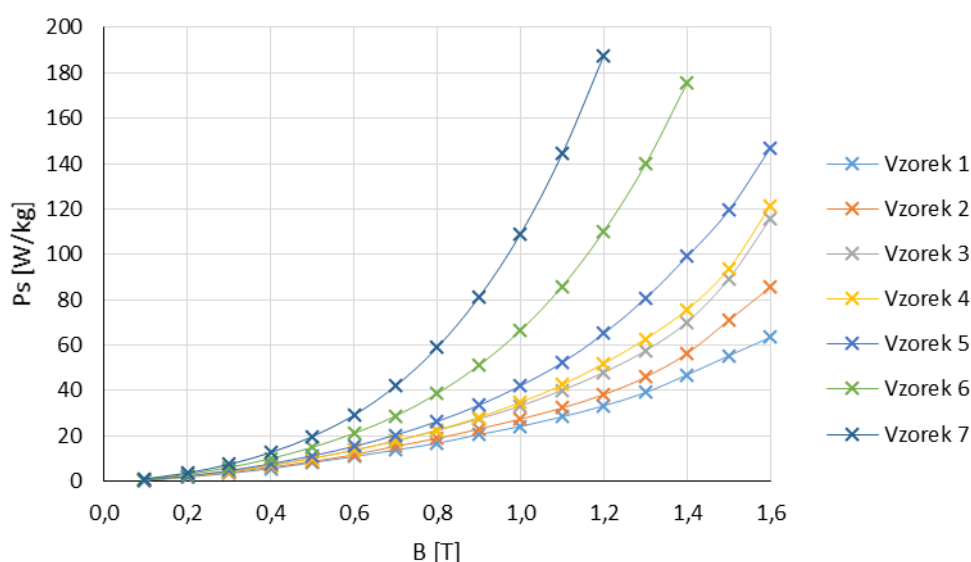
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,38 – 0,45	Max. 0,40	0,60 – 0,90	Max. 0,025	Max. 0,035	0,90 – 1,20	0,15 – 0,30

Tabulka F. 2 Geometrické rozměry a vstupní parametry testovaných vzorků z materiálu 42CrMo4

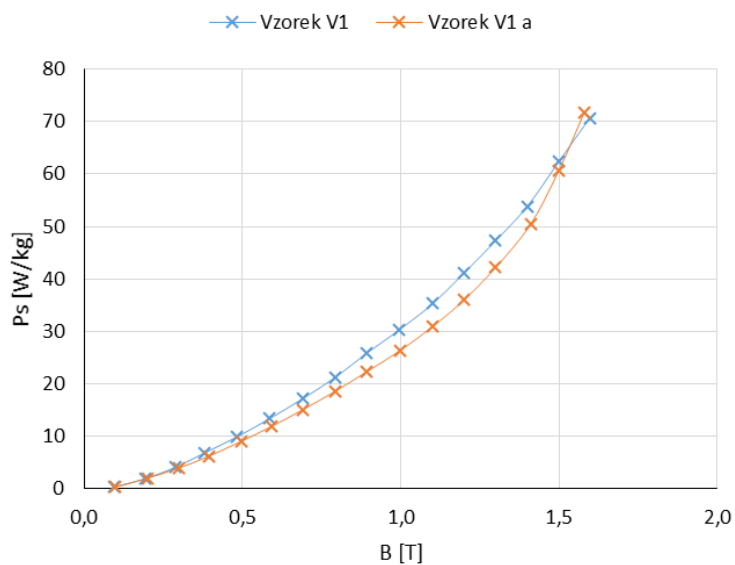
Rozměry vzorků	1	2	3	4	5	6	7	V1	V1 a	
Vnější průměr	55	44,3	44,4	55	55	55	55	38	38	mm
Vnitřní průměr	47,3	40,4	38,1	47,4	45	40	33	35	35	mm
Tloušťka	1	2	3,1	3,8	5	7,5	11	1,6	1,6	mm
Hmotnost	4,6	3,9	9,4	17,7	30,9	64,9	129,5	2,1	2,1	g
Primární vinutí	109	97	95	104	110	92	126	87	89	závitů
Sekundární vinutí	20	40	20	40	20	40	40	20	20	závitů
Poměr průměrů	1,16	1,10	1,17	1,16	1,22	1,37	1,67	1,09	1,09	

Tabulka F. 3 Výsledky kvazistatického měření na materiálu 42CrMo4

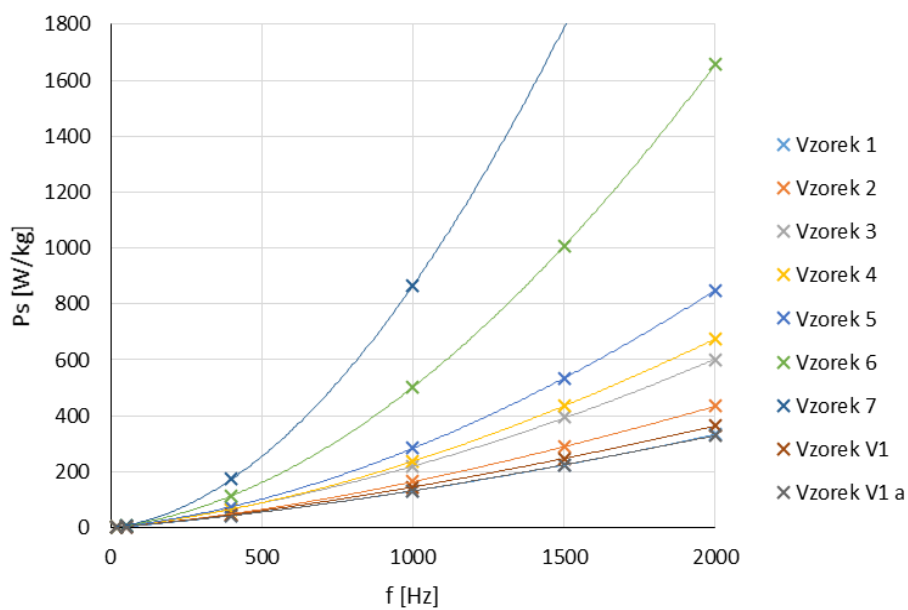
Vzorek	1	4	5	7	2	3	V1	V1.1	
$B_{\max}$	1,513	1,503	1,501	1,483	1,507	1,495	1,499	1,53	T
B_r	1,18	1,3	1,31	1,31	1,24	1,24	1,036	1,24	T
H_c	965	891	885	902	928	947	1321	1057	A/m
$\mu_{\max}$	474	601	611	602	523	518	340	587	
$H(\mu_{\max})$	1546	1297	1279	1324	1452	1453	2151	1613	A/m
$H_{\max}$	6866	4602	4088	3790	5595	5650	5501	5061	A/m
W_s	0,785	0,723	0,708	0,692	0,777	0,773	0,927	0,856	J/kg
k_h	0,4497	0,8763	1,0798	1,9377	0,6657	0,9545	0,5069	0,5415	
k_c	0,0010	0,0079	0,0110	0,0237	0,0036	0,0082	0,0012	0,0019	
k_e	0,0021	0,0932	0,1275	0,1771	0,0506	0,1203	0,0003	0,0211	



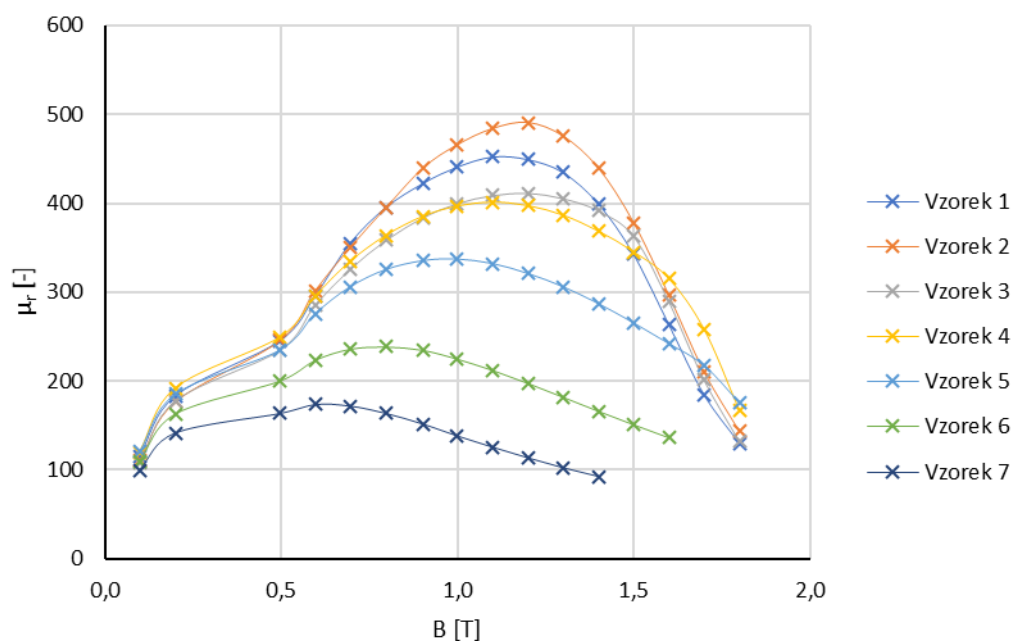
Obr. F. 1 Srovnání velikosti magnetických ztrát P_s se vzrůstající magnetickou indukcí B (50Hz); materiál 42CrMo4



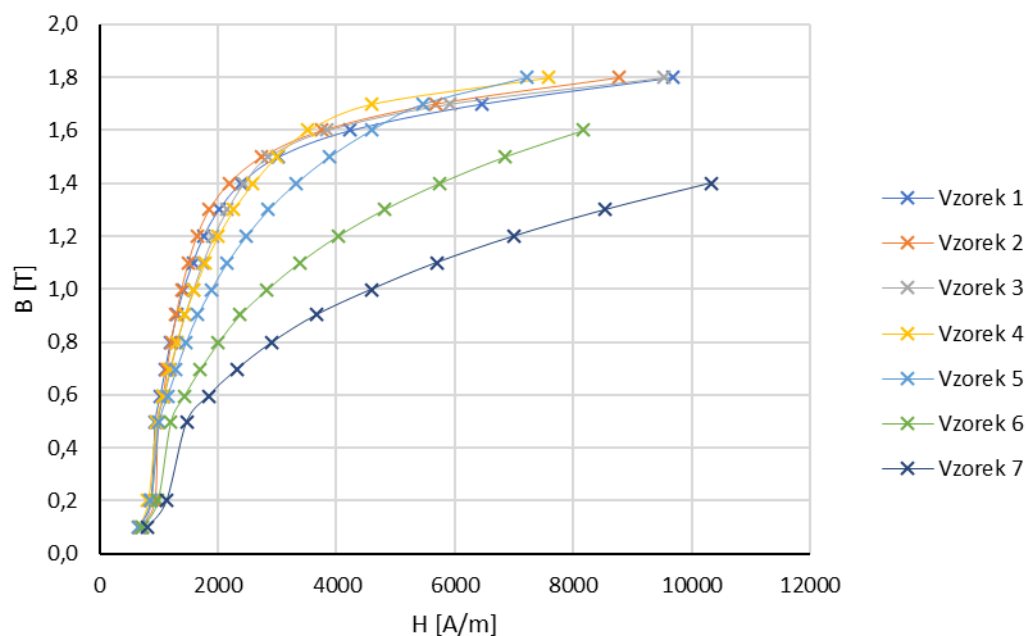
Obr. F. 2 Srovnání velikosti magnetických ztrát P_s se vzrůstající magnetickou indukcí B (50Hz), vzorek V1 válcován, V1a válcován a vyžhán; materiál 42CrMo4



Obr. F. 3 Srovnání velikosti magnetických ztrát P_s se vzrůstající frekvencí f a magnetické indukcí 0,3 T; materiál 42CrMo4



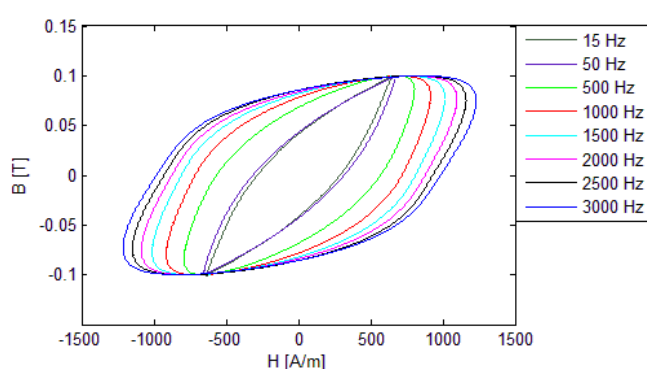
Obr. F. 4 Relativní permeabilita při měření na 50Hz v závislosti na B ; materiál 42CrMo4



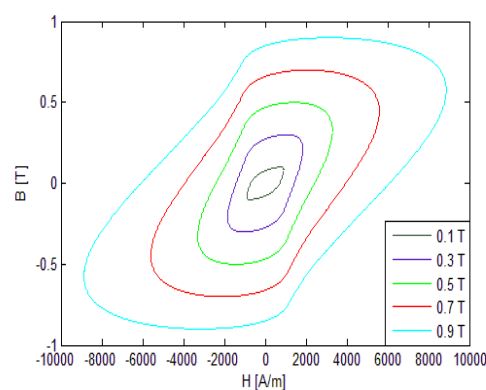
Obr. F. 5 Magnetizační křivka při měření na 50Hz v závislosti na B ; materiál 42CrMo4

Tabulka F. 4 Geometrické rozměry a vstupní parametry pro měření testovaného vzorku 41CrMo4

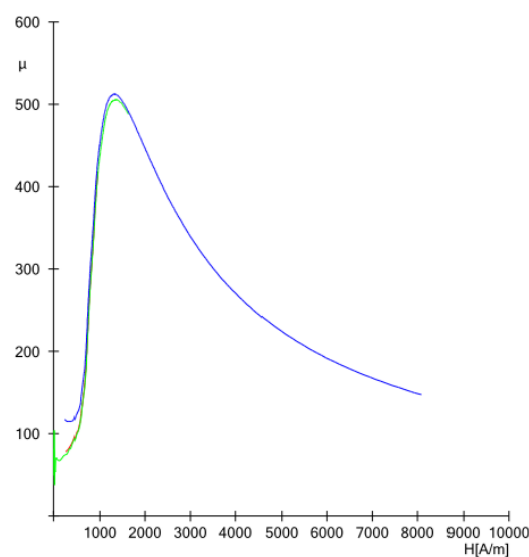
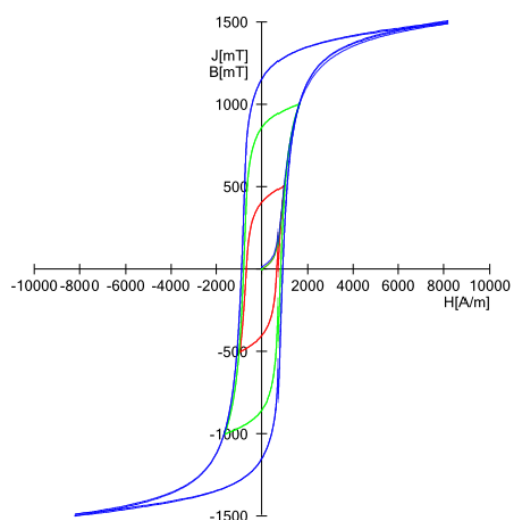
Vzorek	Vzorek 1	
Vnější průměr	44,4	mm
Vnitřní průměr	38,1	mm
Tloušťka	3,0	mm
Hmotnost	9,1	g
Primární vinutí	101	Závitů
Sekundární vinutí	20	Závitů



Obr. F. 6 Hysterezní křivky pro různé frekvence při $B = 0,1\text{T}$; materiál 41CrMo4



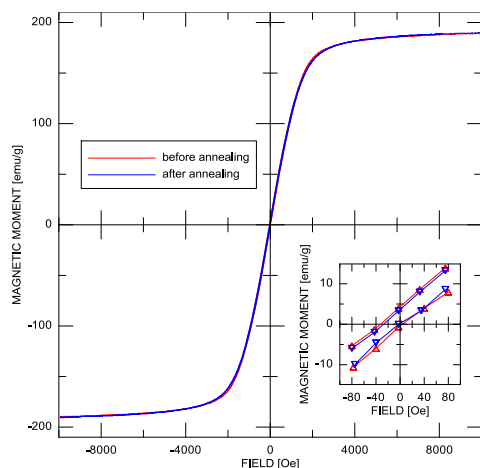
Obr. F. 7 Hysterezní křivky s rozdílným sycením pro $f = 1000\text{ Hz}$; materiál 41CrMo4



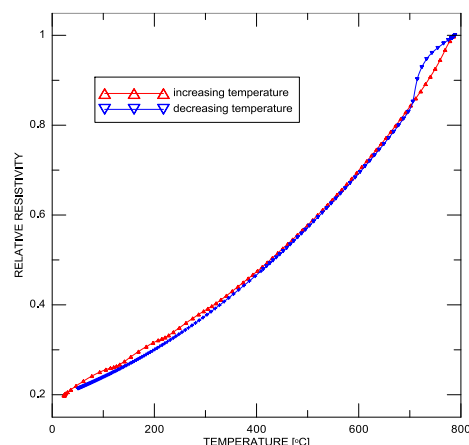
Obr. F. 8 Hysterezní křivky a závislost permeability na intenzitě H pro tři velikosti sycení, kvazistatické měření; materiál 41CrMo4

Tabulka F. 5 Chemické složení 41CrMo4 podle hmotnostních procentech [68]

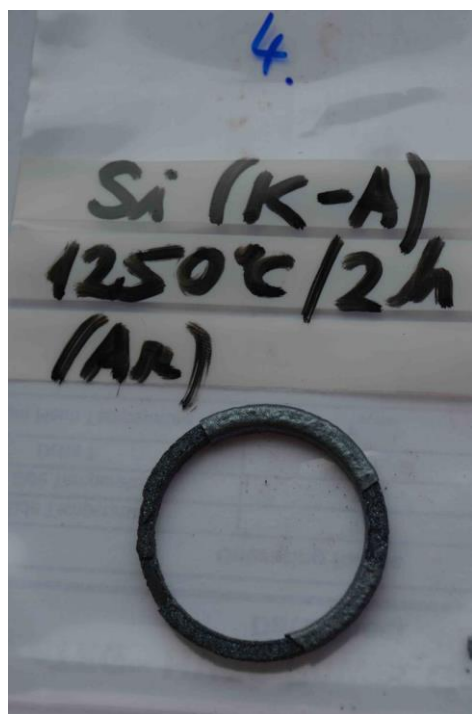
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,36 - 0,44	0,15 - 0,40	0,50 - 0,80	Max. 0,025	Max. 0,035	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30



Obr. F. 9 DC hysterezní smyčky vzorku oceli 41CrMo4 před a po teplemém cyklu 25 – 800 – 25 °C ve vakuu.



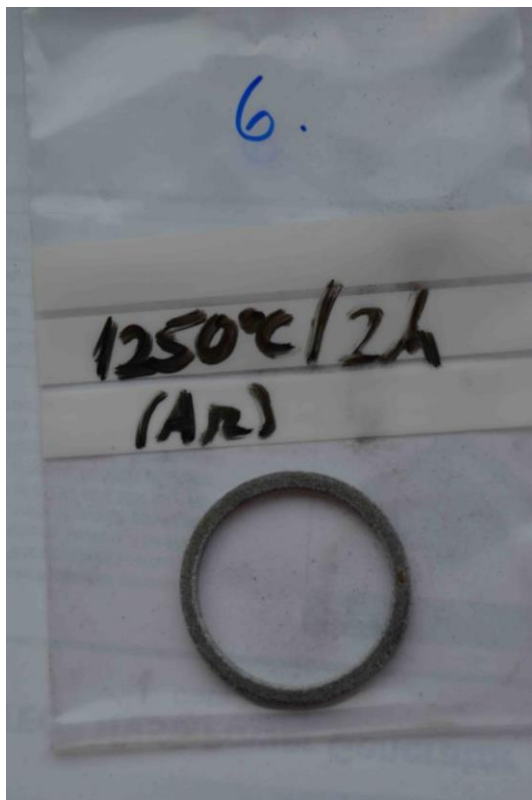
Obr. F. 10 Teplotní závislost vzorku oceli 41CrMo4 ve vakuu.



Obr. F. 11 Nástrík křemíku plamenem při teplotě 1250°C po dobu 2h



Obr. F. 12 Plazmatický nástrík CuSn6 při teplotě 1250°C po dobu 2h

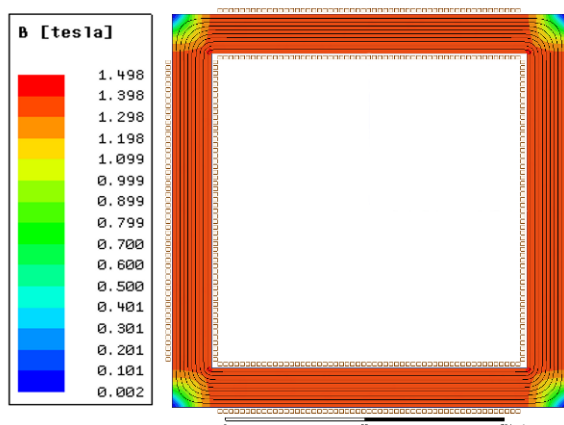


Obr. F. 13 Silikonizace při 1250°C po dobu 2h

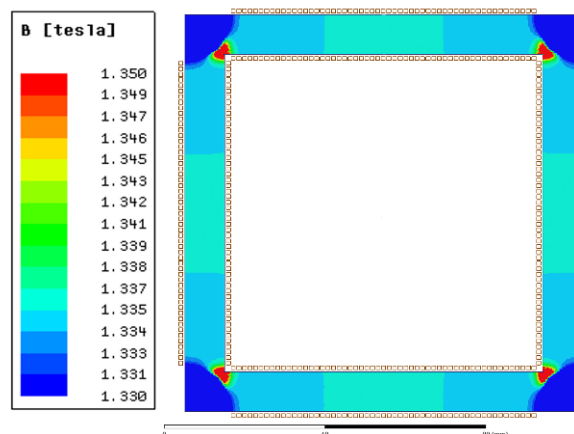


Obr. F. 14 Silikonizace při 800°C po dobu 6h,
dopovaná vrstva částečně odstraněna

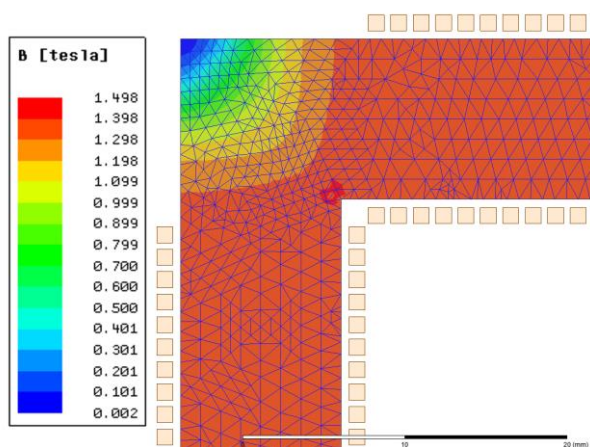
PŘÍLOHA G – SIMULACE MAXWELL



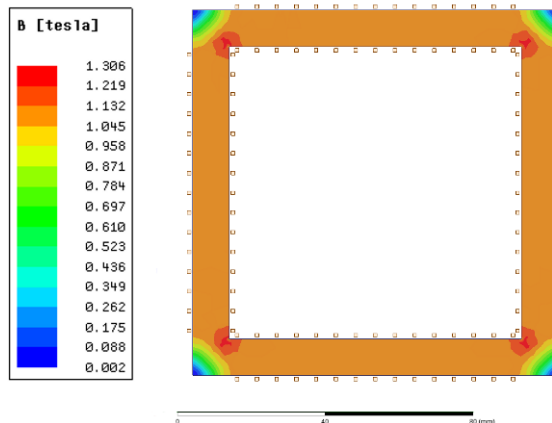
Obr. G. 1 Celkový pohled na čtvercový vzorek A, včetně znázornění siločar



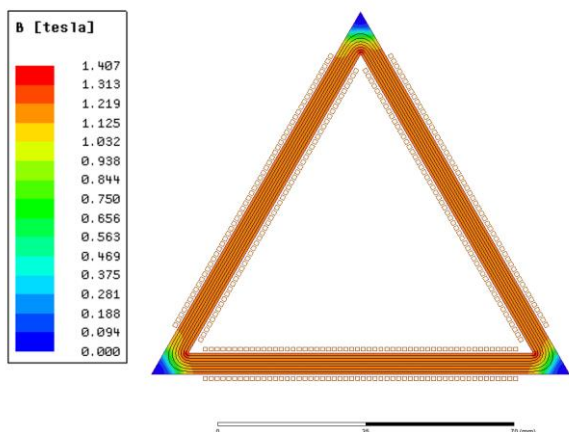
Obr. G. 2 Celkový pohled na čtvercový vzorek A se zobrazením rozdílů magnetické indukce



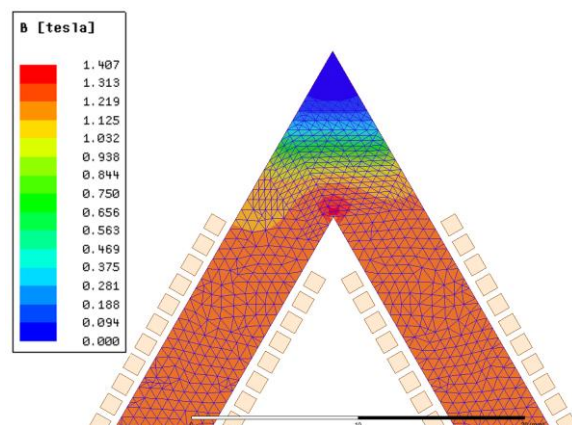
Obr. G. 3 Rozložení magnetické indukce u vzorku A



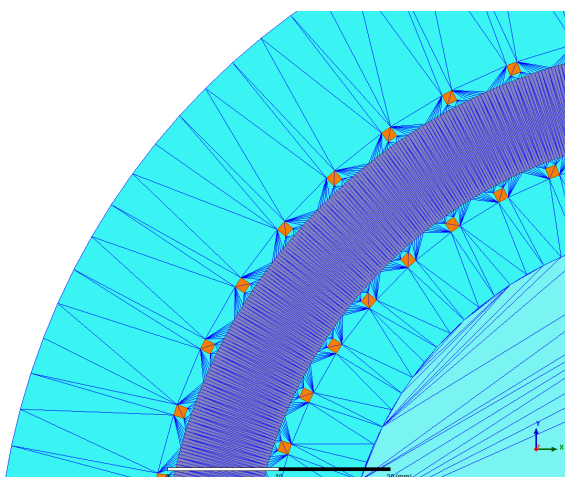
Obr. G. 4 Vzorek A s menším počtem závitů při zachování velikosti budícího proudu.



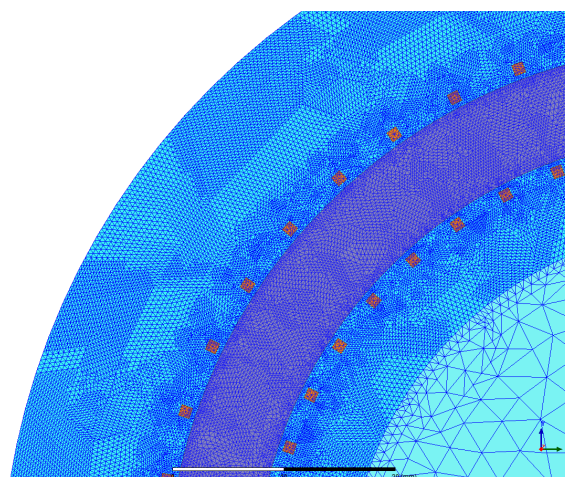
Obr. G. 5 Rozložení magnetické indukce
v trojúhelníku+ siločáry



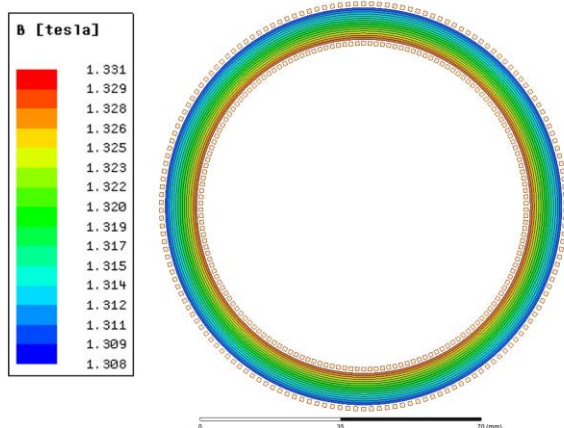
Obr. G. 6 Rozložení magnetické indukce
v trojúhelníku + použitá mesh



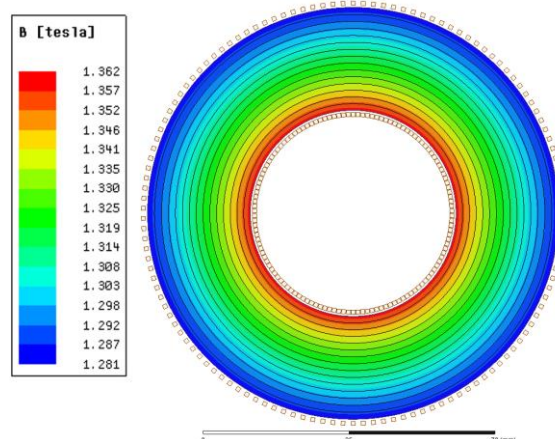
Obr. G. 7 Počáteční Mesh s počtem elementů
5158.



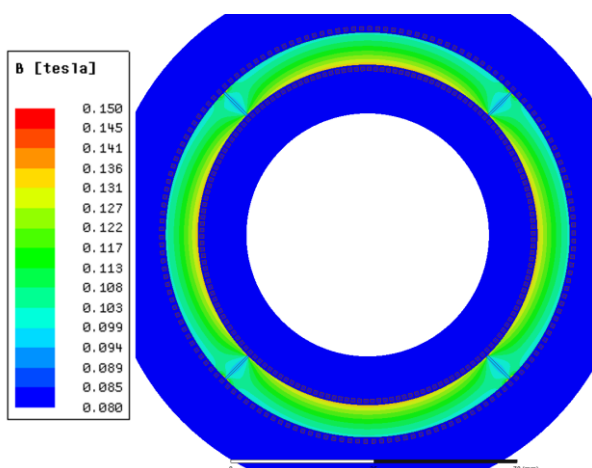
Obr. G. 8 Mesh s počtem elementů 241 690.



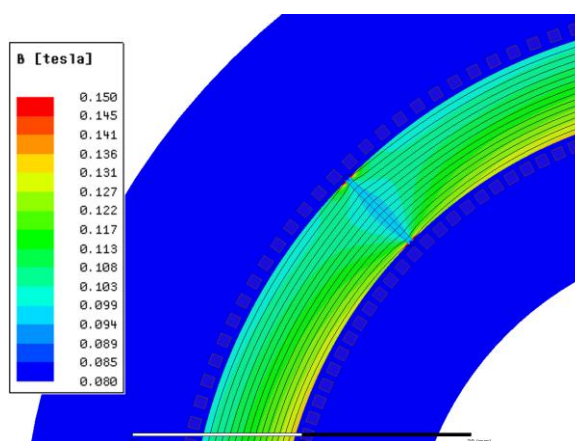
Obr. G. 9 Rozložení magnetického pole v toroidu 100/84mm, poměr 1,19



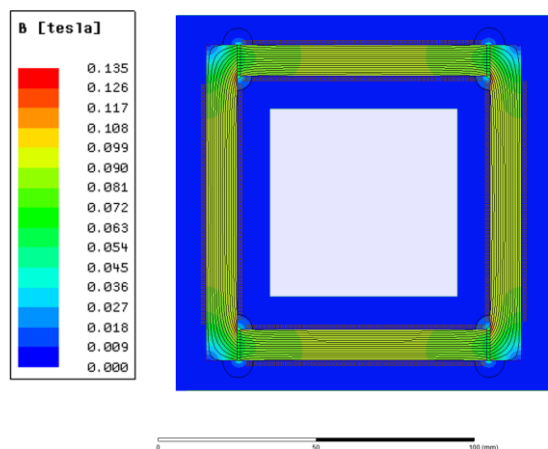
Obr. G. 10 Rozložení magnetického pole v toroidu 100/50mm, poměr 1,5



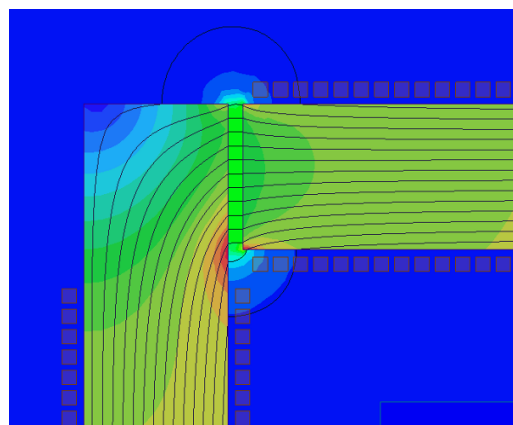
Obr. G. 11 Toroid se čtyřmi vzduchovými mezerami v celkové délce 4mm



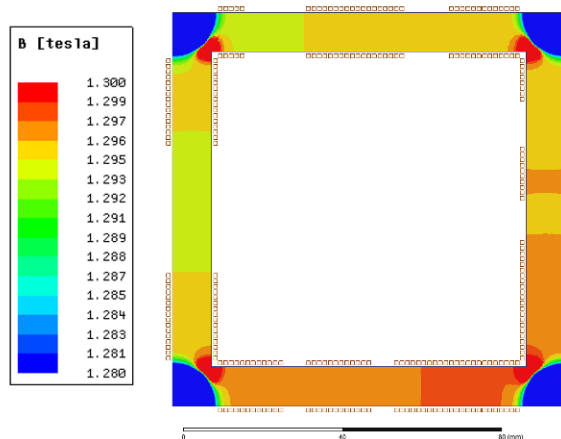
Obr. G. 12 Detail



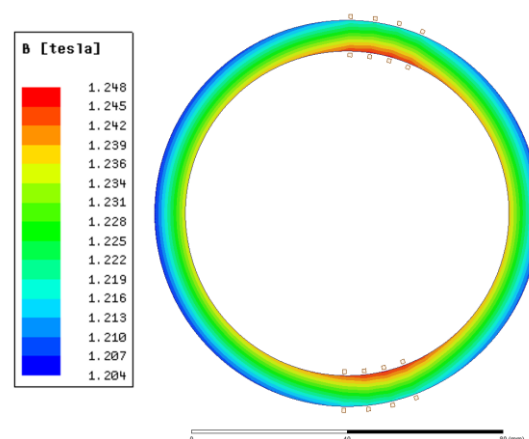
Obr. G. 13 Čtverec se čtyřmi vzduchovými mezerami v celkové délce 4mm



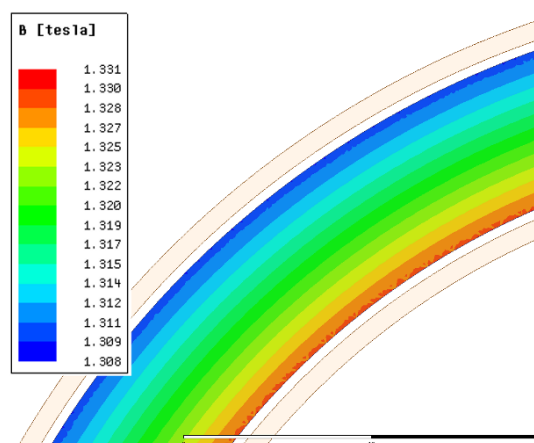
Obr. G. 14 Detail vzduchové mezery



Obr. G. 15 Nerovnoměrně rozložené budící vinutí a magnetické pole (odchylka 0,01T)

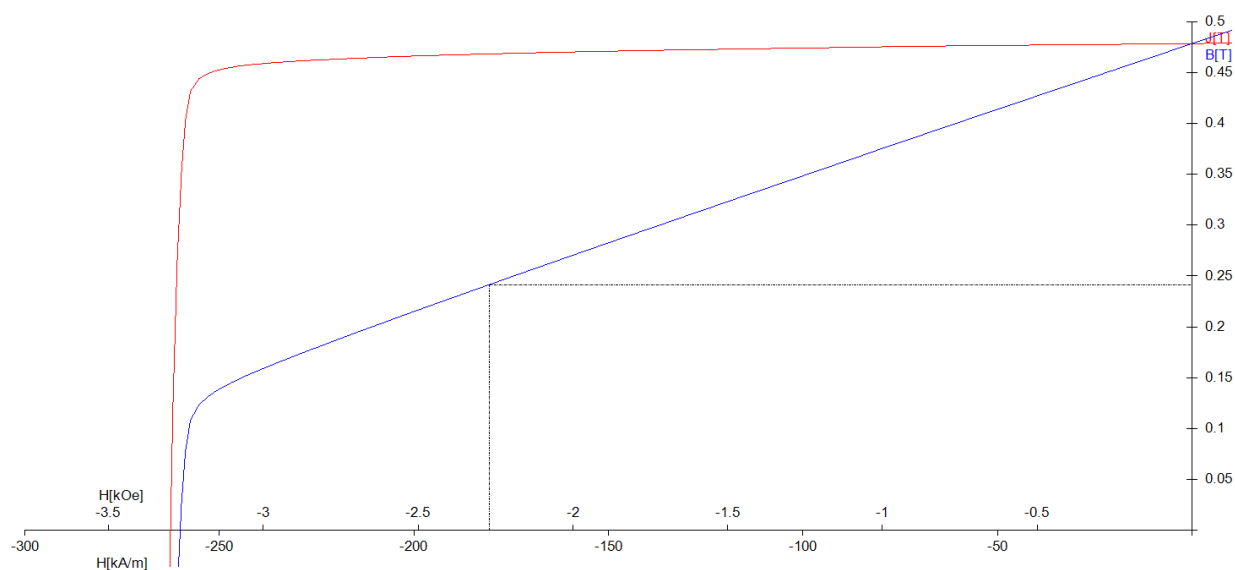


Obr. G. 16 Nerovnoměrně rozložené budící vinutí a magnetické pole (odchylka 0,01T)

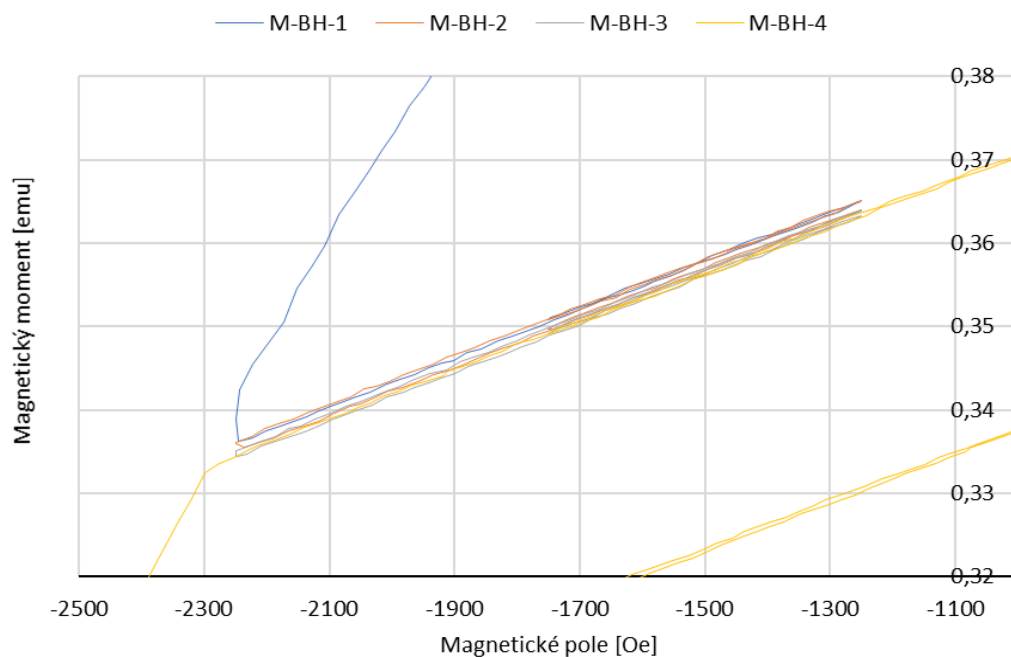


Obr. G. 17 Detail rozložení magnetického pole v toroidu s jedním závitem, pro zjednodušení simulace

PŘÍLOHA H – PERMANENTNÍ MAGNETY



Obr. H. 1 Pracovní bod permanentního magnetu HTY45E, vzorek tvaru kolečko



Obr. H. 2 Minoritní hysterezní křivky při výchozím bodě -1750 Oe