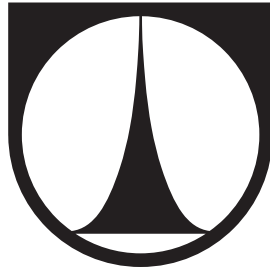


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

**OVLIVNĚNÍ ZAPÍNACÍHO PROUDU TRANSFORMÁTORU
MATERIÁLEM JÁDRA**

Diplomová práce

Bc. Roman Heidler

Liberec 2013

OVLIVNĚNÍ ZAPÍNACÍHO PROUDU TRANSFORMÁTORU MATERIÁLEM JÁDRA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

STUDIJNÍ PROGRAM: N2612 – ELEKTROTECHNIKA A INFORMATIKA

STUDIJNÍ OBOR: 3906T001 – MECHATRONIKA

Autor práce
Vedoucí práce

Bc. Roman Heidler
Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

POČET STRAN TEXTU	47
POČET OBRÁZKŮ	42
POČET TABULEK	12
POČET PŘÍLOH	4

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Roman Heidler**
Osobní číslo: **M11000270**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**
Název tématu: **Ovlivnění zapínacího proudu transformátoru materiálem jádra**
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

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

1. Proveďte rešerši na téma vliv materiálu jádra na vlastnosti transformátoru. Seznamte se s problematikou zapínacích proudů.
2. Připravte měřicí aparaturu pro měření velikosti zapínacího proudu a ztrát v železe na vzorku jednofázového transformátoru.
3. Proveďte měření pro tři různé druhy materiálu jádra transformátoru. Měření provádějte jako opakované a výsledky statisticky vyhodnoťte: velikost ztrát naprázdno, velikost maxima zapínacího proudu.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 40–50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


- [1] **JIZIERSKI, Eugeniusz. Transformátory. Akademica, Praha: 1973**
- [2] **FAKTOR, Zdeněk. Transformátory a cívky. BEN, Praha 1999, ISBN 80-86056-4-X**
- [3] **DRAXLER Karel, KAŠPAR Petr, RIPKA Pavel. Magnetické prvky a měření. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 1994. ISBN 978-80-01-03970-0**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Novák, Ph.D.**
Ústav mechatroniky a technické informatiky


Konzultant diplomové práce: **Ing. Leoš Beran, Ph.D.**
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2013**


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2012

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D za hodnotné rady. Dále chci na tomto místě také poděkovat své rodině za podporu ve studiu.

Anotace

Ovlivnění zapínacího proudu transformátoru materiálem jádra

Bc. Roman Heidler

Tato práce se zabývá měřením ztrát naprázdno a map zapínacích proudů transformátorů pro 3 druhy magnetického jádra. Při připojení transformátoru k napájení dochází ke vzniku zapínacích proudů. To v praxi nutí projektanty navrhovat zařízení s omezením těchto proudů nebo v horším případě volí předimenzované jištění. Druhá volba může mít negativní vliv na bezpečnost celého zařízení. Měřené transformátory mají výkon 1,2 kVA. Mapy zapínacích proudů transformátorů jsou naměřeny s krokem 5° pro dvě hodnoty remanentní indukce. To odpovídá připnutí transformátoru v různém časovém okamžiku k síti. Změřen je i vliv vinutí na velikost zapínacího proudu pro dvě provedení cívek. Hodnoty zapínacích proudů jsou změřeny opakovaně s vyčíslením nejistot měření. Tyto mapy lze použít pro návrh zařízení k omezení zapínacích proudů měřených typů transformátorů. Dále je změřen tvar hysterezních křivek pro každé jádro. Měření bylo provedeno na výkonovém programovatelném zdroji. Ztráty naprázdno jsou určeny pomocí dvou přístupů: napětí a proudu naprázdno a v druhém případě pomocí plochy hysterezní křivky.

Klíčová slova: měření, transformátor, zapínací proud, ztráty naprázdno

Annotation

Influence of Magnetic Material on Transformer Inrush Current

Bc. Roman Heidler

The present diploma thesis aims at the inrush current and no-load losses of transformers, with the power of 1,2 kVA. The inrush current originate when a transformer is connected to net. Designers must use equipments that reduce this inrush current or they must design oversized protection. The second choice could bring a negative effect of safety of designed device. The measurement is analyzed on four types of magnetic core. The map of inrush current of the transformer has been measured with the step of 5° for two values of remanent induction. An influence of coils on inrush current is measured for two different coils. Values of inrush current are measured repeatedly with error determination. Maps of inrush current could be used for their minimization. Further is measured shape of hysteresis curve for all of magnetic cores. The measurement is done with a high-power programmable source. The no-load losses have been measured with the help of two approaches; firstly with voltage and no-load current and secondly with the help of the surface of hysteresis curve.

Key words: measurement, transformer, inrush current, no-load losses

Obsah

1. Úvod.....	15
2. Transformátor	16
2.1 Náhradní schéma transformátoru.....	17
2.2 Hysterezní smyčka.....	19
2.2.1 Vliv stejnosměrné složky na hysterezní smyčku.....	21
3. Materiály používané pro jádra transformátorů	22
3.1 Elektrotechnické plechy Et	24
3.2 Elektrotechnické plechy Eo	24
3.3 Elektrotechnické plechy Ei	24
3.4 Amorfnní materiály.....	25
3.5 Ferity.....	25
4. Zapínací proud a ztráty transformátoru	26
4.1 Zapínací proud transformátoru	26
4.1.1 Vliv vzduchové mezery na zapínací proud.....	28
4.2. Ztráty transformátoru	30
4.2.1 Ztráty ve vinutí.....	30
4.2.2 Hysterezní ztráty	30
4.2.3 Ztráty vířivými proudy.....	31
5. Měřicí aparatura.....	34
5.1 Měření ztrát naprázdno	34
5.2 Měření zapínacího proudu	36
6. Měřené vzorky transformátorů	41
6.1 Plechy M165-35S	42
6.3 Plechy M400-50A.....	43
6.2 Plechy M530-50A.....	44
6.4 Cívka 500 VA	45
6.5 Cívka 1200 VA	47
7. Vyhodnocení naměřených dat	50
7.1 Ztráty naprázdno	50
7.1.1 Rozdělení ztrát naprázdno	55
7.2 Zapínací proud	56
8. Závěr	60
Seznam použité literatury	62
9. Přílohy.....	63
9.1 Naměřené mapy zapínacích proudů měřených vzorků.....	63
9.1.1 Materiál jádra M165-35S.....	63
9.1.2 Materiál jádra M400-50A	65
9.1.3 Materiál jádra M530-50A	66
9.2 Hysterezní křivky použitých materiálů jádra.....	68
9.2.1 Hysterezní křivka M165-35S.....	68
9.2.2 Hysterezní křivka M400-50A	68
9.2.3 Hysterezní křivka M530-50A	69
9.3 Ztráty naprázdno použitých materiálů jádra	69

9.3.1 Ztráty naprázdno pro M165-35S.....	69
9.3.2 Ztráty naprázdno pro M400-50A.....	70
9.3.3 Ztráty naprázdno pro M530-50A.....	70
9.4 Obsah přiloženého DVD.....	71

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled základních vlastností magnetických materiálů [4]	22
Tabulka 2: Magnetické vlastnosti materiálů a celkové ztráty při frekvenci 50Hz [10]..	33
Tabulka 3: Tabulka významných vlastností plechů M165-35S [12].....	42
Tabulka 4: Tabulka naměřených hodnot hmotnosti jádra M165-35S	43
Tabulka 5: Tabulka významných vlastností plechů M400-50A [12]	43
Tabulka 6: Tabulka naměřených hodnot hmotnosti jádra M400-50A.....	44
Tabulka 7: Tabulka významných vlastností plechů M530-50A [12]	44
Tabulka 8: Tabulka naměřených hodnot hmotnosti jádra M530-50A.....	44
Tabulka 9: Tabulka naměřených parametrů levého sloupku cívky 500 VA	46
Tabulka 10: Tabulka naměřených parametrů pravého sloupku cívky 500 VA	47
Tabulka 11: Tabulka naměřených parametrů levého sloupku cívky 1200 VA	48
Tabulka 12: Tabulka naměřených parametrů pravého sloupku cívky 1200 VA	49

Seznam obrázků

Obrázek 1: Základní typy transformátorů, A plášťový, B jádrový, C toroidní	16
Obrázek 2: Náhradní schéma transformátoru	17
Obrázek 3: Náhradní schéma magnetických toků v transformátoru [1]	18
Obrázek 4: Náhradní zapojení transformátoru ve tvaru Γ -článku [2].....	18
Obrázek 5: Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu [3].....	19
Obrázek 6: Fáze hysterezní smyčky a závislost relativní permeability na intenzitě magnetického pole [3]	20
Obrázek 7: Vliv stejnosměrné složky napájení na hysterezní smyčku [4]	21
Obrázek 8: Reálné dynamické hysterezní smyčky s napájením se stejnosměrnou složkou [4].....	21
Obrázek 9: Rozdělení materiálů pro výrobu magnetického obvodu	22
Obrázek 10: Možné tvary magnetických plechů, vlevo – se stykem plechů pod úhlem 90° , uprostřed se stykem plechů pod úhlem 45° v rohách a 90° ve středu, vpravo – se stykem plechů pod úhlem 45° v rohách i ve středu.....	23
Obrázek 11: Hrníčkové jádro [5]	23
Obrázek 12: Průběh indukčního toku $\Phi(t)$ a vzniku zapínacího proudu [1].....	26
Obrázek 13: Průběh indukčního toku $\Phi(t)$ a napětí U při připojení k síti v době a) maximálního napětí, b) nulového napětí, c) nulového napětí při zbytkové remanenci Φ_0 [5].....	27
Obrázek 14: Průběh zapínacího proudu s jádrem bez vzduchové mezery [4].....	29
Obrázek 15: Průběh zapínacího proudu s jádrem se vzduchovou mezerou [4].....	29
Obrázek 16: Vliv vzduchové mezery na tvar hysterezní smyčky [4].....	29
Obrázek 17: Hysterezní ztráty plechů v závislosti na velikosti sycení [7]	31
Obrázek 18: Schéma měřicí aparatury pro měření ztrát naprázdno.....	34
Obrázek 19: Fotografie měřicí aparatury ztrát naprázdno	35
Obrázek 20: Vývojový diagram programu pro měření ztrát na prázdno	36
Obrázek 21: Schéma měřicí aparatury pro měření zapínacího proudu a jeho realizace. 37	
Obrázek 22: Funkční bloky AC zdroje Agilent 6811B [11].....	37
Obrázek 23: Schéma připojení vzorku k AC zdroji Agilent 6813B [11]	38
Obrázek 24: Vývojový diagram programu pro měření zapínacích proudů	39
Obrázek 25: Příklad generovaného průběhu napětí z programovatelného zdroje a analyzátoru Agilent 6813B, nahoře celý průběh, dole detail připnutí v požadovaném úhlu	40
Obrázek 26: Fotografie měřeného transformátoru RJV 1,6	41
Obrázek 27: Fotografie měřeného transformátoru, s detailem vzduchové mezery	41
Obrázek 28: Fotografie použité digitální váhy při měření hmotnosti jádra.....	42
Obrázek 29: Rozměry magnetických plechů (vlevo a uprostřed), střední siločára (vpravo).....	43
Obrázek 30: Narys cívky 500 VA.....	45
Obrázek 31: Půdorys cívky 500 VA	46
Obrázek 32: Půdorys cívky 1200 VA	47
Obrázek 33: Narys cívky 1200 VA.....	48
Obrázek 34: Naměřené hodnoty napětí a primárního proudu, M165, $U_{zdr} = 220$ V.....	50
Obrázek 35: Typická dynamická hysterezní smyčka, M165, $U_{zdr} = 220$ V, vlevo před centrováním, vpravo po centrování	52
Obrázek 36: Závislost celkových měrných ztrát na prázdno na velikosti sycení jádra pro zkoumané materiály, 500 VA	55
Obrázek 37: Závislost ztrát na prázdno na velikosti sycení jádra,.....	56

Obrázek 38: Průběh zapínacího proudu při počáteční indukci $B_0 = 0,4$ T, fáze připnutí 180°	56
Obrázek 39: Mapa zapínacích proudů s chybovými úsečkami v závislosti na fázi připnutí k napájení pro primární napětí 50 až 85 V, plechy M530, vnitřní vinutí vstupní.....	57
Obrázek 40: Porovnání zapínacích proudů měřeného transformátoru RJV pro 3 typy magnetických plechů, pro primární napětí 80, vnitřní vinutí vstupní.....	58
Obrázek 41: Porovnání zapínacích proudů měřeného transformátoru RJV pro: 2 typy magnetických plechů a 2 cívky, pro primární napětí 65 V, vnitřní vinutí vstupní .	59
Obrázek 42: Porovnání zapínacích proudů měřeného transformátoru RJV při zapojení primární cívky jako vnitřní a vnější cívky a 2 typy magnetických plechů, pro primární napětí 65 V, cívka 1200 VA.....	59

Seznam použitých symbolů

a	W.s	koeficient zahrnující ostatní parametry u hysterezních ztrát
b	W.s ²	koeficient zahrnující ostatní parametry u vířivých ztrát
B	T	magnetická indukce
B _a	T	indukce ve vzduchové mezeře
B _m	T	amplituda pracovní indukce
B _r	T	remanentní indukce
B _s	T	indukce nasycení jádra
B ₀	T	počáteční magnetická indukce
d	m	tloušťka plechu
e		kombinovaná standardní nejistota
E		rozšířená standardní nejistota
f	Hz	kmitočet
H	A.m ⁻¹	intenzita magnetického pole
H _c	A.m ⁻¹	koercitivní magnetická intenzita
i	A	primární proud naprázdno
I _{MAX}	A	maximální hodnota zapínacího proudu
$\overline{i_{ef}}$	A	průměr efektivních hodnot primárního proudu
I ₁	A	proud primárním vinutím
I ₂ '	A	proud sekundárním vinutím přepočítaný na primární stranu
I _μ	A	magnetizační proud
k		počet měření
k _u		koeficient rozšíření pro pravděpodobnost výskytu správné hodnoty v daném intervalu 95 % je k _u = 2
l	m	šířka plechu
l _s	m	délka střední siločáry
l ₀	m	délka indukční čar ve vzduchu
L _{1σ} (H)	Ω	rozptylová reaktance primárního vinutí
L _{2σ} ' (H)	Ω	rozptylová reaktance sekundárního vinutí přepočítaná na primární stranu
n		pořadí naměřeného vzorku
N		počet závitů primární i sekundární cívky

p_H	$W \cdot kg^{-1}$	měrné hysterézni ztráty
p_V	$W \cdot kg^{-1}$	měrné ztráty vířivými proudy
P_{BH}	W	ztráty naprázdno určené pomocí hysterézni smyčky
P_H	W	hysterézni ztráty
P_V	W	ztráty vířivými proudy
P_{UI}	W	ztráty naprázdno určené pomocí primárního proudu a sekundárního napětí naprázdno
q		rozšiřující koeficient Studentova rozdělení o hodnotě 3,1824
r		procentuální chyba z odečtené hodnoty
RDG		naměřená hodnota, resp. efektivní hodnota
R_{FE}	Ω	virtuální odpor, na kterém vznikají stejné ztráty jako v „železe“
RG		měřicí rozsah
R_1	Ω	odpor primárního vnutí
R_2'	Ω	odpor sekundárního vnutí přepočítaný na primární stranu
s		procentuální chyba z měřicího rozsahu
S	m^2	průřez jádra transformátoru
S_a	m^2	průřez mezery
S_c	m^2	průřez jádra
S_{Hd}	$W \cdot s \cdot m^{-3}$	plocha dynamické hysterézni smyčky
S_{Hs}	$W \cdot s \cdot m^{-3}$	plocha statické hysterézni smyčky
t	s	čas
T	s	perioda
T_S	s	perioda vzorkování
u	V	sekundární napětí naprázdno
u_a		standardní nejistota typu a
u_b		standardní nejistota typu b
u_{bi}		standardní nejistota typu b od i-tého zdroje chyb
$\overline{u_{ef}}$	V	průměr efektivních hodnot sekundárního napětí
U_{i1}	V	vnitřní indukované napětí transformátoru
U_1	V	napětí na primárním vnutí
U_2'	V	napětí na sekundárním vnutí přepočítané na primární

		stranu
V	m^3	objem magnetického materiálu
\bar{x}		aritmetický průměr naměřených hodnot
x_i		naměřená hodnota
$X_h(H)$	Ω	hlavní reaktance transformátoru
Δi	A	chyba měření primárního proudu
Δu	V	chyba měření sekundárního napětí
γ	$kg \cdot m^{-2}$	měrná hmotnost plechu
η		konstanta závislá na použitém materiálu
μ_0	$H \cdot m^{-1}$	permeabilita vakua
Θ		charakterizuje pravděpodobnostní rozdělení chyb, zvolil jsem hodnotu $\sqrt{3}$ (základní výstupní kontrola výrobce)
ρ	$\Omega \cdot m$	měrný odpor plechu
σ_k		činitel tvaru magnetovacího střídavého proudu (pro sinusový průběh 1,11)
Φ	Wb	hlavní indukční tok
Φ_a	Wb	indukční tok ve vzduchové mezeře
Φ_c	Wb	indukční tok uzavřený v jádře
Φ_m	Wb	maximální indukční tok
Φ_r	Wb	remanentní indukční tok
Φ_1	Wb	indukční tok primární cívky
Φ_σ	Wb	rozptylový tok

1. Úvod

Při připojování transformátorů ke zdroji protéká vinutím zapínací proud, který je závislý na konkrétní konstrukci magnetického obvodu, odporu vinutí, okamžiku připojení ke zdroji a impedancí napájecího zdroje. Tento přechodový jev může vzniknout také při krátkodobém výpadku napájení. Zapínací proud transformátorů může být i více než 25násobek proudu jmenovitého. Takto velký proud může vybavit jistící prvky a tím i odpojit transformátor od napájení. Zařízení se musí zapínat několikrát, než obsluha nebo řídicí systém vystihne okamžik, kdy přechodový jev nevznikne.

Existuje několik způsobů, jak tento zapínací proud omezit například použitím vhodného stupňového spouštěče. V této práci bude zkoumán vliv materiálu jádra elektromagnetického transformátoru na velikost zapínacího proudu. Dá se předpokládat, že vyšší ztráty v magnetickém obvodu povedou ke snížení zapínacího proudu. Zevrubným prohledáním monografií o transformátorech ani důkladnou rešerší článků odborných periodik se nepodařilo nalézt žádné publikované výsledky.

Cílem této práce je změřit, jak velikost zapínacích proudů závisí na použitém materiálu jádra transformátoru. Zároveň bude provedeno měření tvaru magnetizační smyčky a ztrát naprázdno z důvodu přesného definování materiálu jádra.

Měření budou provedena na k tomu zhotovených vzorcích transformátorů s výměnnými jádry. Pro měření byl vybrán transformátor RJV o typové velikosti jádra 1,2 kVA firmy SVED Liberec. Transformátor bude při měření napájen výkonovým programovatelným zdrojem, takže průběh měření bude přesně definovaný a opakovatelný. Měření napětí a proudů bude provedeno analyzátozem výkonu. Magnetické veličiny budou určeny nepřímo z veličin obvodových. Měření budou provedena jako opakovaná a statisticky vyhodnocena.

V první části této práce je stručný přehled o teorii vlivu jádra na vlastnosti transformátoru, vzniku a průběhu zapínacího proudu. Druhá část se zabývá měřením zapínacího proudu a ztrát naprázdno konkrétního transformátoru a zpracováním naměřených dat.

2. Transformátor

Transformátor je střídavý elektrický netočivý stroj, který mění parametry elektrické energie (velikost napětí a proudu) při zachování konstantní frekvence. Transformátor se skládá z primárního vinutí, magnetického obvodu a jednoho nebo více sekundárních vinutí. Proud protékající primárním vinutím vytváří okolo sebe magnetický tok podle Ampérova zákona. Tento tok je směřován jádrem transformátoru. V sekundární cívce se podle Faradayova indukčního zákona indukuje napětí odpovídající změně indukčního toku.

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = \sum I \quad (1)$$

H intenzita magnetického pole

I proud protékající plochou, která je ohraničena křivkou C

d \vec{l} orientovaný element křivky C

$$u_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

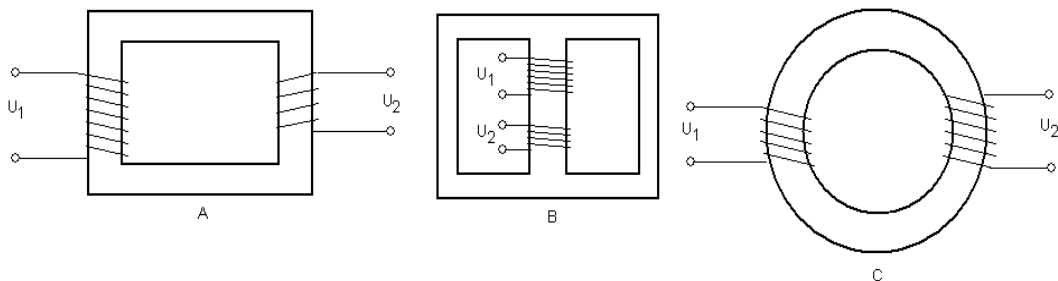
u_i indukované napětí v sekundární cívce

N počet závitů sekundární cívky

Φ magnetický tok, který protéká sekundární cívkou

t čas

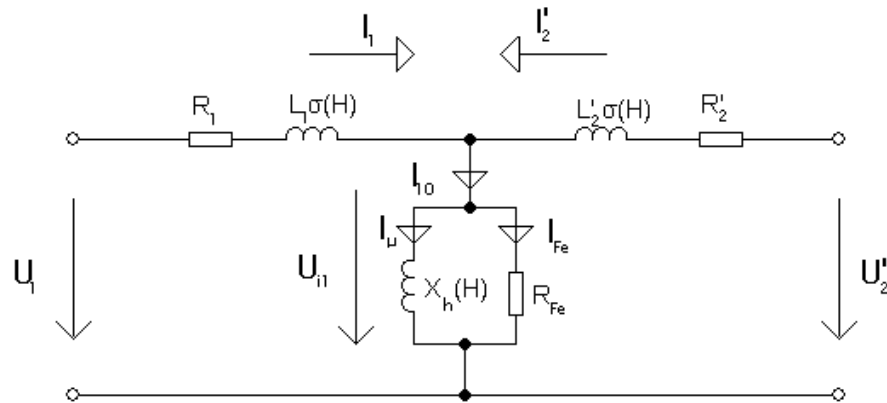
Magnetický obvod je složen ze speciálních transformátorových plechů, které jsou mezi sebou odděleny izolací. Podle tvaru magnetických plechů tak můžeme rozlišovat typy transformátorů na plášťový, jádrový a toroidní. Transformátorové plechy jsou spojeny svorníky nebo jsou k sobě svařeny.



Obrázek 1: Základní typy transformátorů, A plášťový, B jádrový, C toroidní

2.1 Náhradní schéma transformátoru

Pro popis zapínacího proudu a ztrát transformátoru je vhodné uvést náhradní schéma skutečného transformátoru. Jedno z možných náhradních schémat je uvedeno na následujícím obrázku.



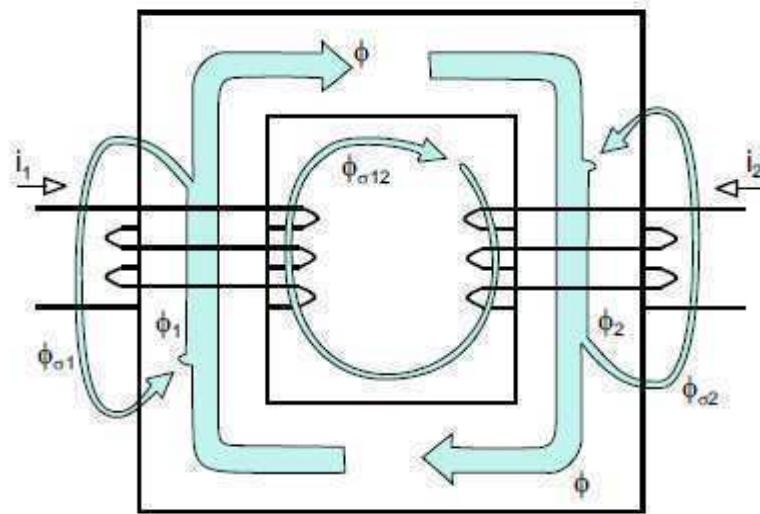
Obrázek 2: Náhradní schéma transformátoru

U_1	napětí na primárním vinutí
I_1	proud primárním vinutím
R_1	odpor primárního vinutí
$L_{1\sigma}(H)$	rozptylová reaktance primárního vinutí
U_{i1}	vnitřní indukované napětí transformátoru
$X_h(H)$	hlavní reaktance transformátoru
R_{Fe}	virtuální odpor, na kterém vznikají stejné ztráty jako v „železe“
I_μ	magnetizační proud
U_2'	napětí na sekundárním vinutí přepočítané na primární stranu
I_2'	proud sekundárním vinutím přepočítaný na primární stranu
R_2'	odpor sekundárního vinutí přepočítaný na primární stranu
$L_{2\sigma}'(H)$	rozptylová reaktance sekundárního vinutí přepočítaná na primární stranu

Rozptylové i hlavní reaktance a také rezistor reprezentující ztráty magnetického obvodu nejsou konstantami, ale jsou závislé na magnetizaci jádra H .

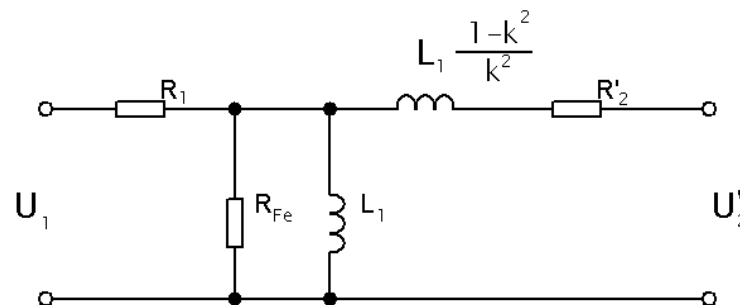
Rozdělení indukčního toku v magnetickém obvodu transformátoru je zobrazeno na obrázku 3. Indukční tok Φ_1 , který vytvoří N závitů primární cívky protékané primárním proudem i_1 , se rozdělí na hlavní indukční tok Φ a rozptylový tok. Část rozptylového toku se uzavře jen přes primární cívku tj. $\Phi_{\sigma 1}$ a část bude procházet i přes

sekundární cívku $\Phi_{\sigma 12}$. Sekundární cívkou pak prochází Indukční tok Φ_2 , který je také složen z hlavního a rozptylového toku.



Obrázek 3: Náhradní schéma magnetických toků v transformátoru [1]

Podle Patočky [2] existuje nekonečný počet náhradních schémat transformátoru, z nichž některé jsou fyzikálně realizovatelné a některé nikoliv. Dále se zde uvádí, že pro popis transformátoru napětí existuje přesné a výhodné náhradní zapojení pouze ve tvaru Γ -článku (obrázek 4). Naproti tomu pro popis transformátoru proudu je jediná vhodná varianta ve tvaru T -článku. Praktický význam T -článku i ostatních z nekonečně mnoho variant uvádí autor za skoro nulový. Základní nevýhodou T -článku je, že nemá schopnost vypovídat o magnetických jevech uvnitř transformátoru. Náhradní zapojení musí splňovat dvě základní podmínky, do přepočítané zátěže musí dodávat stejný výkon jako původní transformátor a musí mít i stejnou vstupní impedanci jako původní transformátor.



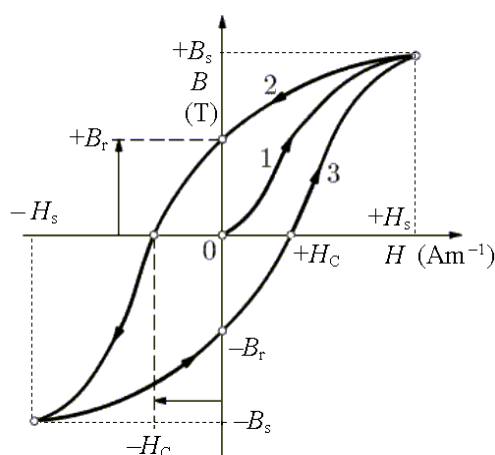
Obrázek 4: Náhradní zapojení transformátoru ve tvaru Γ -článku [2]

- k činitel vazby
- L_1 indukčnost primárního vinutí

Nevýhodou T-článku je existence dvou rozptylových indukčností v náhradním schématu. Patočka uvádí i jeden zajímavý postulát: celkový ekvivalentní průřez vzdušných rozptylových cest jednoho vinutí se skládá ze tří složek, jako by se skutečná izolační mezera mezi vinutími o dané ploše zdánlivě na obě strany rozšířila o příspěvky odpovídajícím vnitřním rozptylům obou vinutí (nikoliv pouze jednoho sledovaného vinutí). Z toho vyplývá, že separace indukčnosti na dvě hlavní a dvě rozptylové indukčnosti nemá jednoznačné řešení.

2.2 Hysterezní smyčka

Hysterezní smyčka popisuje vlastnosti magnetického obvodu. Je to závislost měrného toku B magnetického obvodu na velikosti intenzity elektrického pole. Prvotní magnetizaci, kdy je demagnetované jádro poprvé magnetováno, zobrazuje křivka 1 na obrázku 5. Provozní přemagnetování jádra pak popisují křivky 2 a 3, které se při střídavém buzení opakují. Remanentní indukce je označena B_r , a je to zbytková indukce, která zůstane v materiálu při nulové intenzitě vnějšího pole, pokud se pohybujeme po křivce 2 nebo 3. Při vypínání transformátoru, kdy klesá proud a intenzita magnetického pole na nulu, ovšem zbytková indukce může nabýt libovolné hodnoty mezi $-B_r$ a $+B_r$. Koercitivní magnetická intenzita H_c je potřebná intenzita vnějšího magnetického pole k vynulování magnetické indukce v jádře při pohybu po křivce 2 nebo 3.

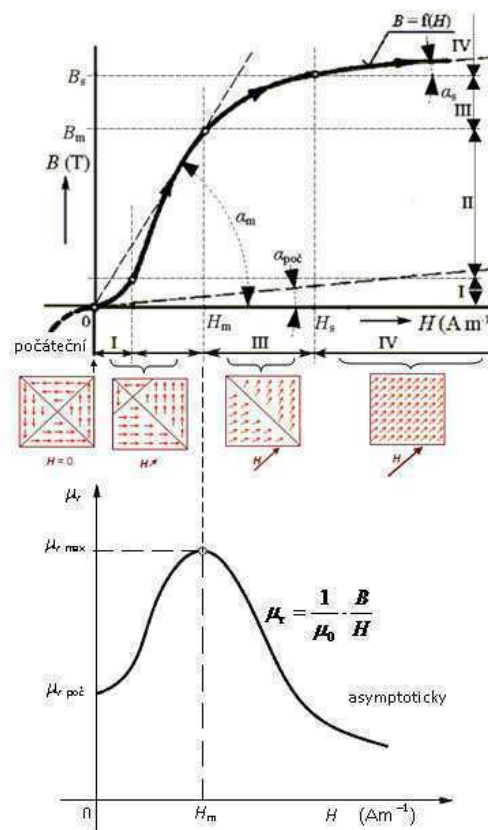


Obrázek 5: Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu [3]

Tvar hysterezní smyčky je ovlivněn použitým materiálem na výrobu jádra a jeho technologickým a zejména teplem zpracováním. Podle hodnoty koercitivní síly H_c se

magnetické materiály dělí na magneticky měkké a tvrdé, hraniční hodnota je $1 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$. Tvar magnetizační smyčky je určen posuny stěn magnetických domén materiálu. Doménou nazýváme oblast feromagnetika, ve které magnetické momenty jednotlivých atomů směřují stejným směrem. Toto spontánní zmagnetování je možné jen u látek, jejichž atomy mají dostatečně velký magnetický moment a které jsou uspořádány tak, že jejich atomy jsou od sebe v tak malých vzdálenostech. Z běžných látek jde o Fe, Ni, Co a některé jejich slitiny.

Hysterezní smyčku lze rozdělit do čtyř fází (obrázek 6).



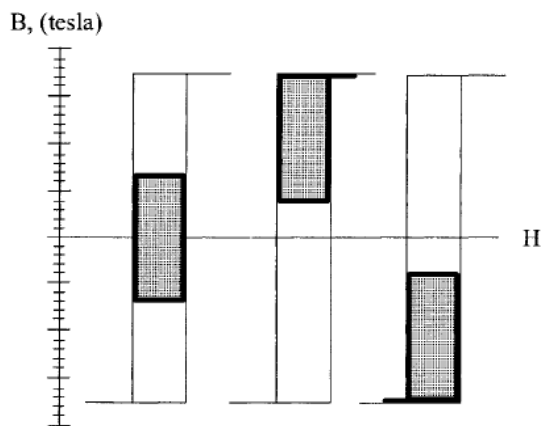
Obrázek 6: Fáze hysterezní smyčky a závislost relativní permeability na intenzitě magnetického pole [3]

V počáteční fázi jsou v materiálu magnetické momenty domén rovnoměrně rozloženy tak, že jejich celkový součet je nulový. V další fázi probíhají vratné posuvy stěn domén ve prospěch domén se spontánní magnetizací ve směru vnějšího pole, které se rozšiřují. Ve třetí oblasti dochází ke stáčení vektorů spontánní magnetizace domén do směru vnějšího pole. V této fázi dochází ve větší míře k nevratným posuvům doménových stěn. Při nevratných posunech dochází k nespojitostem na magnetizační křivce (Barkhausenův jev). Poslední část křivky je již oblast nasycení magnetického jádra, kde

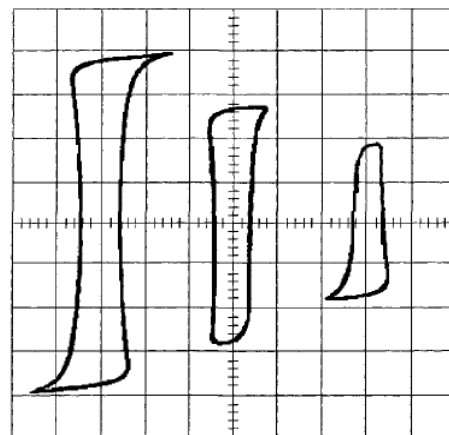
jsou všechny magnetické momenty domén stočeny do směru vnějšího pole. Při dalším zvyšování vnějšího pole se celková magnetizace jádra již nemůže zvyšovat. Průběh velikosti relativní permeability v závislosti na magnetické indukci je zobrazen dole na obrázku 6. Podle Patočky [2] je hysterezní smyčka při harmonickém magnetování vždy středově souměrná.

2.2.1 Vliv stejnosměrné složky na hysterezní smyčku

Jestliže je primární vinutí napájeno napětím obsahující stejnosměrnou složku, tak dochází k nesymetrii hysterezní smyčky (obrázek 7). Magnetický tok je integrálem napětí. Stejnosměrná složka napětí je konstantou po integraci je tato složka toku lineární funkcí času. Výsledkem je tedy neustálý posun hysterezní křivky až do mezí, které jsou dány saturací materiálu. Hysterezní smyčka je posunuta ve směru osy magnetické indukce až do saturace. Přičemž jádro může být v jednom směru přesycené a v druhém směru se saturace nedosáhne. V rozvodné síti elektrické energie se může objevit stejnosměrná složka vlivem ostatních spotřebičů např. provozováním řízených usměrňovačů.



Obrázek 7: Vliv stejnosměrné složky napájení na hysterezní smyčku [4]

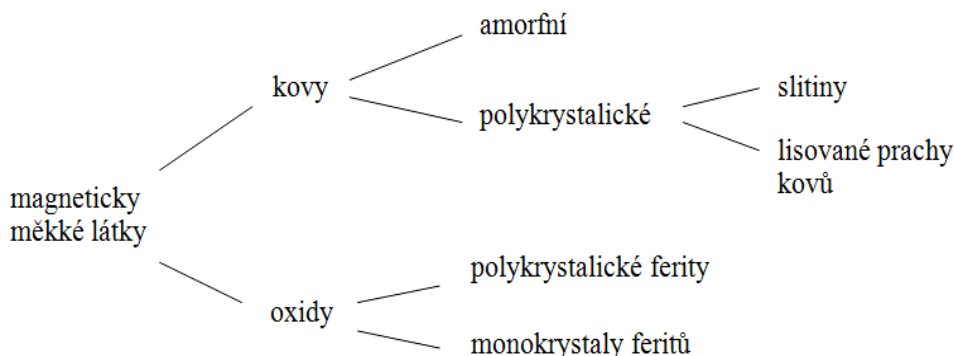


Obrázek 8: Reálné dynamické hysterezní smyčky s napájením se stejnosměrnou složkou [4]

Na obrázku 8 je zobrazen průběh dynamické hysterezní smyčky při napájení se stejnosměrnou složkou, které je popsáno např. v knize od MCLYMAN [4].

3. Materiály používané pro jádra transformátorů

K výrobě jader transformátorů se používají magneticky měkké materiály, které lze rozdělit do několika skupin, jak je zobrazeno na obrázku 9. Z kovových materiálů se používají slitiny železa nebo niklu s dalšími přísadami. Pro výrobu feritů se používají oxidy manganu, zinku a dalších.



Obrázek 9: Rozdělení materiálů pro výrobu magnetického obvodu

Základní vlastnosti používaných materiálů pro výrobu jader transformátorů jsou uvedeny v následující tabulce.

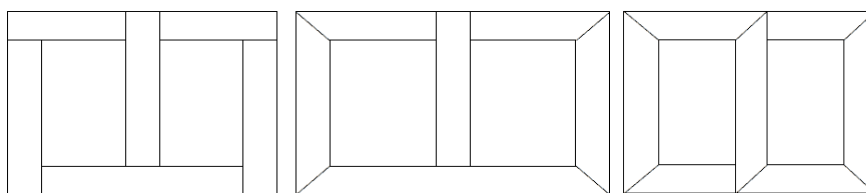
Tabulka 1: Přehled základních vlastností magnetických materiálů [4]

Magnetic Material Properties				
Material Name	Trade Name Composition	Initial Permeability μ_i	Flux Density Tesla B_s	Typical Operating Frequency
Silicon	3-97 SiFe	1500	1.5-1.8	50-2k
Orthonol	50-50 NiFe	2000	1.42-1.58	50-2k
Permalloy	80-20 NiFe	25000	0.66-0.82	1k-25k
Amorphous	2605SC	1500	1.5-1.6	250k
Amorphous	2714A	20,000	0.5-6.5	250k
Amorphous	Nanocrystalline	30,000	1.0-1.2	250k
Ferrite	MnZn	0.75-15k	0.3-0.5	10k-2M
Ferrite	NiZn	0.20-1.5k	0.3-0.4	0.2M-100M

Transformátory menších výkonů se většinou vyrábějí z normalizovaných jader nebo z jader, jejichž parametry jsou mezi výrobcem a spotřebitelem sjednány. Pro vyšší výkony řádově více než jednotky kilowattů jsou jádra složená z pásů vystřižených z tabulí magnetických plechů. Ocel, která se používá pro výrobu jader, je vyválcována do tenkých tabulí nebo pásů, které jsou označovány jako elektrotechnické plechy.

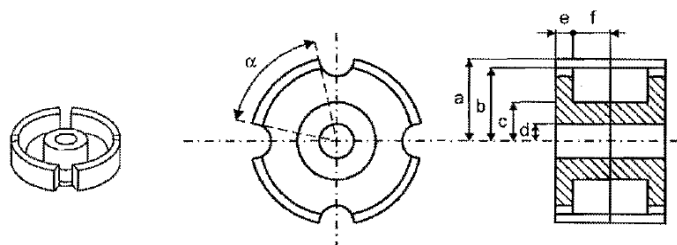
Transformátorové plechy jsou tříděny podle ztrátového čísla p_x s jednotkou W/kg, kde x je indukce sycení. Omezujícím vlivem na přenášený výkon je teplota okolí a teplo vznikající činností transformátoru, které kladou nároky na třídu izolace a tím i konečnou cenu transformátoru.

Z transformátorových plechů se pro výrobu magnetického obvodu vystřihují části s různými tvary, tak aby magnetický obvod měl nejmenší ztráty (obrázek 10). Tvar jednotlivých částí v minulosti také závisel na možnosti jejich výroby. Technologicky jednodušší je stříhání magnetických plechů pod úhlem 90° než při ostřejších úhlech. Transformátorové plechy se na sebe vrství na požadovanou výšku a po té se k sobě spojí. Každý plech je opatřen izolací pro snížení ztrát vířivými proudy. Spojení plechů je realizováno vnějším svorníkem, šrouby, které procházejí skrz plechy nebo jsou plechy k sobě spojeny svárem. Dobré upevnění plechů je důležité k omezení hlučnosti transformátorů a prodloužení životnosti transformátoru, protože plechy mají tendenci se pohybovat vlivem silových účinků magnetického pole.



Obrázek 10: Možné tvary magnetických plechů, vlevo – se stykem plechů pod úhlem 90° , uprostřed se stykem plechů pod úhlem 45° v rohách a 90° ve středu, vpravo – se stykem plechů pod úhlem 45° v rohách i ve středu

Z feritových materiálů se vyrábějí jádra pro transformátory pracujících na vyšších kmitočtech. Důvodem je velmi nízká vodivost feritů a tím související minimální ztráty vířivými proudy. Ferity jsou ale velmi křehké, proto jsou vhodné jen pro menší jádra. Příkladem feritového jádra je hrníčkové jádro na obrázku 11.



Obrázek 11: Hrníčkové jádro [5]

3.1 Elektrotechnické plechy Et

Patří mezi starší typy plechů používaných v jádrech transformátoru. Jsou válcované za tepla a nejsou magneticky orientované. V jejich složení je vyšší obsah křemíku, který snižuje jejich vodivost, ale také snižuje indukci nasycení. Jejich nevýhodou je větší tvrdost, která způsobuje rychlé ztupení nástrojů, kterými se tento plech zpracovává. Pro snížení ztrát se tyto plechy ještě tepelně zpracovávají žháním. Plechy se ztrátovým číslem do 1,8 W/kg byly používány jako transformátorové a plechy s vyšším číslem se označovali jako plechy dynamové, které se používali při výrobě motorů. Plechy Et byly pro jejich nevýhody nahrazeny materiály Eo a Ei.

3.2 Elektrotechnické plechy Eo

Jsou plechy válcované za studena s následným tepelným zpracováním v průběžných pecích většinou v ochranné atmosféře. Touto technologií dochází k orientaci krystalů oceli, směr hrany krychle základní krystalografické buňky je snadno přemagnetovatelný, směr plošné úhlopříčky je nesnadno přemagnetovatelný. Tento materiál dosahuje nízkých ztrát jen v případě, že se indukční tok uzavírá ve směru válcování. V knize [5] je uvedeno, že ztráty ve směru kolmém na směr válcování jsou až o 260 % vyšší než ve směru válcování. To umožňuje snadněji dosáhnout vyšší hodnotu indukce a menších rozměrů magnetického obvodu. Nahrazením plechů Et plechy Eo lze při konstrukci transformátorů ušetřit finanční náklady v řádech jednotek tisíc korun na tunu plechů. Tyto plechy mají v zahraniční označení GOSS (Grain Oriented Silicon Steel).

3.3 Elektrotechnické plechy Ei

Jsou izotropní plechy, které se používají především u menších transformátorů a asynchronních elektromotorů. Uplatnění nalézají i v jádrech sdělovacích transformátorů. Mají lepší mechanické vlastnosti i nižší ztráty než plechy Et. Plechy Ei mají nižší podíl příměsi křemíku (1 až 1,6 %) než plechy Eo. Magnetické vlastnosti toho materiálu jsou ve směru válcování a ve směru na něj kolmém téměř stejné. Při konstrukci transformátoru tak odpadá nutnost skládat plechy tak, aby magnetický tok procházel materiálem ve směru válcování, kde jsou nejnižší ztráty. Z elektrotechnických plechů tvoří plechy Ei na trhu většinu z objemu výroby.

3.4 Amorfni materiály

Jsou plechy, které využívají technologii rychlého zchlazení ($>10^6$ K/s) s příměsí křemíku, boru nebo uhlíku, které potlačují krystalizaci železa. Zchlazení materiálu z tekutého do pevného skupenství probíhá během 1 až 2 ms. Během této krátké doby se nestačí vytvořit krystaly nebo jsou tyto krystaly jen velmi malé, to má velký vliv na vlastnosti těchto materiálů, které jsou odlišné od krystalických kovových látek.

Využití nacházejí především u výkonových transformátorů z důvodů nižších ztrát a to až třetinových. Nahrazují orientované slitiny železa a křemíku. Oblast nasycení v amorfních materiálech na bázi železa nastává při 1,6 až 1,8 T. To je vykoupeno vyšší pořizovací cenou. Ztráty jsou v tomto materiálu tvořeny především ztrátami vířivými proudy. Tyto plechy se vyrábějí většinou o tloušťkách 0,1 až 0,2 mm, přičemž je dostupná i technologie pro výrobu plechů o tloušťce desítek mikrometrů.

3.5 Ferity

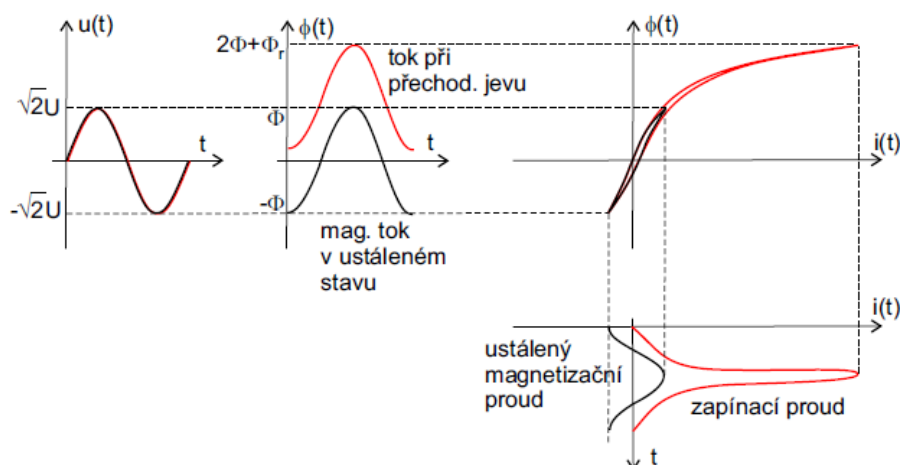
Ferity jsou keramické, polykrystalické, magnetické látky, které mají o osm a více řádů větší měrný odpor než kovové materiály používané pro výrobu magnetických obvodů. Ferity jsou většinou oxidy kovů a vzácných zemin. Vyrábějí se lisováním do tvarů E, U, I a hrníčkových jader. Následuje vypalování v průběžných pecích při teplotách v rozmezí 1100 až 1400 °C. Při vypalování se původní rozměry výlisků značně zmenší a do požadovaných rozměrů se upravují broušením, řezáním diamantovou pilou nebo ultrazvukem. Majoritním zdrojem ztrát jsou u feritů ztráty hysterezní. Hysterezní ztráty rostou přímo úměrně s frekvencí magnetizace a ztráty vířivými proudy s druhou mocninou kmitočtu z tohoto důvodu se při frekvenci nad 300 kHz nevyplácí používat amorfni materiály a nacházejí zde uplatnění feritové jádra.

4. Zapínací proud a ztráty transformátoru

4.1 Zapínací proud transformátoru

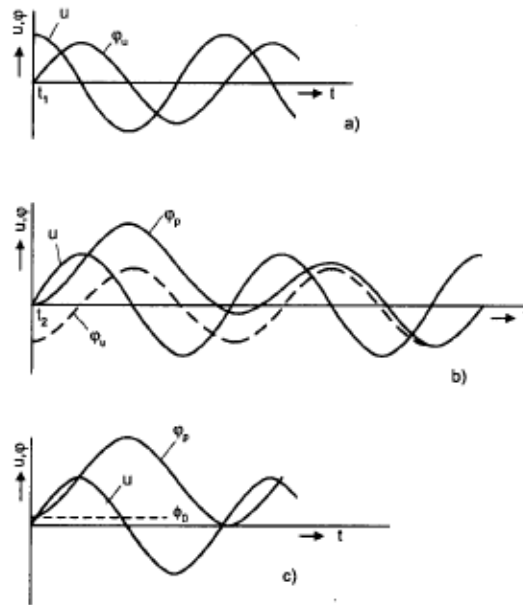
Po sepnutí transformátoru může dojít k přesycení magnetického obvodu, změně rozložení magnetického toku v magnetickém obvodu a vzniku stejnosměrné složky magnetického toku (obrázek 12). Při přechodovém jevu, který může trvat desítky až tisíce period, dochází k přesycení hlavní indukčnosti a poklesu impedance a tím i k nárůstu zapínacího proudu i více než na dvacetinásobek jmenovité hodnoty primárního proudu. Zapínací proud u transformátoru naprázdno je pak omezen jen impedancí sítě a impedancí primárního vinutí. Důsledkem vzniku zapínacího proudu je vybavování jisticích prvků, kterému jde předejít zařazením například stupňového spouštěče nebo jiného typu zařízení k omezení zapínacího proudu. Nejhorší případ nastává při připojení transformátoru k síti při průchodu nulou.

Na obrázku 12 je znázorněn průběh indukčního toku a průběh zapínacího proudu při zapnutí transformátoru v době průchodu nulou a nenulové zbytkové remanenci. Z průběhů lze vidět, že zapínací proud je několikanásobně vyšší než ustálený magnetizační proud.



Obrázek 12: Průběh indukčního toku $\Phi(t)$ a vzniku zapínacího proudu [1]

Na obrázku 13 jsou uvedeny tři různé průběhy napětí a indukčního toku v závislosti na čase při připojení ideálního transformátoru k síti. Na prvním grafu je vidět, že nevznikl žádný přechodový jev, protože transformátor byl připojen k síti při průchodu maximem. Na druhém grafu je zaznamenán přechodový jev, který odpovídá připojení transformátoru při průchodu nulou. Na posledním záznamu je tento průběh ještě zhoršen zbytkovou remanencí magnetického obvodu.



Obrázek 13: Průběh indukčního toku $\Phi(t)$ a napětí U při připojení k síti v době a) maximálního napětí, b) nulového napětí, c) nulového napětí při zbytkové remanenci Φ_0 [5]

Maximální hodnotu zapínacího proudu lze určit pro transformátory s UI, C nebo toroidními jádry podle Nováka [1] z úvahy, že magnetický tok primární cívky Φ_1 musí v každém okamžiku odpovídat indukovanému napětí. V této disertační práci je uveden následující postup výpočtu zapínacího proudu.

Maximální teoretická hodnota magnetického toku je rovna součtu dvojnásobku amplitudy a remanentního magnetického toku.

$$\max(\Phi_1) = 2 \cdot \Phi_m + \Phi_r \quad (1)$$

Φ_m maximální indukční tok

Φ_r remanentní indukční tok

V případě že vznikne přechodový jev, dojde k přesycení magnetického obvodu. Indukční tok v jádru je omezen indukcí nasycení B_s , která je dána druhem použitého materiálu, a průřezem jádra S_c .

$$\Phi_c = B_s S_c \quad (2)$$

Φ_c indukční tok uzavřený v jádře

Indukční tok Φ_1 je složen z indukčního toku uzavřeného v jádře Φ_c a z toku Φ_a , který je vytlačen do vzduchové mezery.

$$\Phi_a = B_a S_a \quad (3)$$

$$\Phi_1 = \Phi_a + \Phi_c \quad (4)$$

B_a indukce ve vzduchové mezeře

S_a průřez mezery

Plocha S_a je dána vnějším průměrem jádra, průměrnou vzdáleností závitů od středu jádra a délkou cívky. Dosazením maximální hodnoty toku za indukční tok Φ_1 lze vyjádřit velikost indukčního toku v mezeře mezi primárním vinutím a jádrem.

$$\Phi_a = \Phi_1 - \Phi_c = 2\Phi_m + \Phi_r - \Phi_c = 2B_m S_c + B_r S_c - B_s S_c \quad (5)$$

B_m amplituda pracovní indukce

B_r remanentní indukce

Magnetickou indukci získáme podělením předchozí rovnice hodnotou S_a .

$$B_a = \frac{S_c}{S_a} (2B_m + B_r - B_s) \quad (6)$$

Maximum zapínacího proudu lze určit pomocí Ampérova zákona pro solenoid. Délka indukčních čar ve vzduchu je označena jako l_0 .

$$I_{MAX} = \frac{H_a l_0}{N} = \frac{B_a l_0}{\mu_0 N} \quad (7)$$

μ_0 permeabilita vakua

Po dosazení magnetické indukce do předchozí rovnice má rovnice následující tvar.

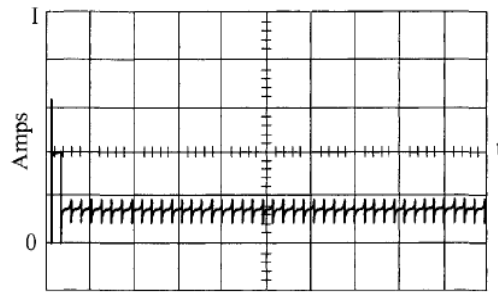
$$I_{MAX} = \frac{1}{\mu_0} \frac{S_c l_0}{S_a N} (2B_m + B_r - B_s) \quad (8)$$

Maximální hodnotu zapínacího proudu můžeme odhadnout z hodnot, které jsou u transformátoru většinou známé nebo které lze naměřit. Z toho vztahu je i zřejmé jaký vliv na zapínací proud má změna magnetického jádra. Při změně jádra se budou měnit hodnoty amplituda pracovní indukce B_m , maximální remanentní indukce B_r a indukce nasycení B_s .

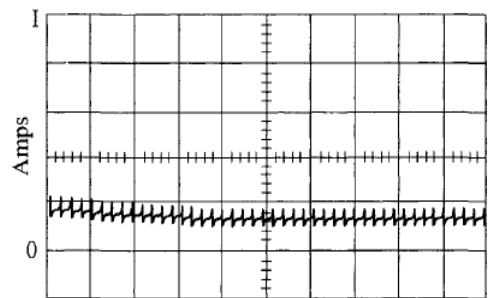
4.1.1 Vliv vzduchové mezery na zapínací proud

Příčná vzduchová mezera v magnetickém obvodu jádra transformátoru má pozitivní vliv na omezení zapínacího proudu transformátoru. V knize [4] je uveden graf

zapínacího proudu transformátoru bez mezery (obrázek 14) i průběh zapínacího proudu transformátoru se vzduchovou mezerou (obrázek 15).

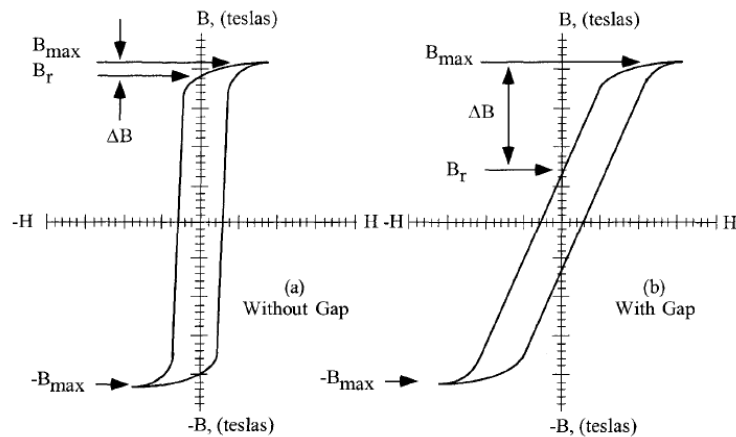


Obrázek 14: Průběh zapínacího proudu s jádrem bez vzduchové mezery [4]



Obrázek 15: Průběh zapínacího proudu s jádrem se vzduchovou mezerou [4]

Mezera v jádře ovlivňuje i tvar hysterezní smyčky. Konkrétní příklad vlivu vzduchové mezery na smyčku je zobrazen na obrázku 16, kde vlevo je hysterezní smyčka bez mezery a vpravo hysterezní smyčka jádra se vzduchovou mezerou. Vliv vzduchové mezery je závislý na délce střední siločáry a na vlastnostech magnetického obvodu bez vzduchové mezery. Vzduchová mezera však zvyšuje magnetický odpor jádra i ztráty, protože zešikmením magnetizační smyčky vzroste magnetizační proud.



Obrázek 16: Vliv vzduchové mezery na tvar hysterezní smyčky [4]

4.2. Ztráty transformátoru

Ztráty transformátoru jsou dány součtem ztrát ve vinutí a ztrát v železe. Ztráty v železe můžeme ještě rozdělit na ztráty způsobené vířivými proudy, ztráty hysterezní a anomální ztráty. Hysterezní ztráty jsou nejčastěji vztaženy na jednotku hmotnosti při kmitočtu magnetování 50 Hz a harmonickém průběhu indukce. Tyto ztráty se projevují oteplením transformátoru, proto musí být transformátor vhodně dimenzován, aby nebyla překročena třída izolace vinutí a transformátorových plechů.

Transformátor dosahuje nejnižších ztrát, jestliže jsou ztráty nakrátko rovné ztrátám naprázdno. Transformátory jsou však nyní provozovány na jmenovitém zatížení, při kterém jsou celkové ztráty 3,5 až 5násobkem ztrát naprázdno. Proud naprázdno kryje především ztráty v železe a proud nakrátko ztráty ve vinutí.

4.2.1 Ztráty ve vinutí

Tyto ztráty vznikají průchodem proudu vinitími na odporech R_1 a R_2' , jsou tedy závislé na zatížení transformátoru. Jouleovy ztráty odpovídají druhé mocnině proudu tekoucího v jednotlivých cívkách. Eliminace těchto ztrát je možná použitím materiálu s lepší měrnou vodivostí nebo větším průřezem, zvýšení průřezu však přináší zvětšení celého transformátoru a nárůst ztrát naprázdno. Odpor vinutí je však i funkcí teploty a frekvence napájení, která způsobuje skin efekt (povrchový jev).

4.2.2 Hysterezní ztráty

Hysterezní ztráty jsou úměrné ploše hysterezní smyčky použitého materiálu magnetického obvodu. Při malé ploše hysterezní smyčky jsou ztráty malé a naopak. Tvar hysterezní smyčky je dán materiálem, ze kterého jsou transformátorové plechy vyrobeny, tepelným zpracováním a mechanickým zpracováním (stříhání, válcování). Hysterezní ztráty také zvyšují různé příměsi, které se do materiálu dostanou při výrobě (uhlík, síra, kyslík, dusík), některé příměsi (křemík) ztráty zase snižují. Hysterezní ztráty jsou úměrné počtu cyklů přemagnetování, jsou tedy úměrné frekvenci přemagnetování. Jeziersky [6] uvádí pro výpočet hysterezních ztrát ve své knize následující vzorec (9). Hysterezní ztráty jsou nezávislé na zatížení transformátoru, zahrnují se proto ke ztrátám naprázdno.

$$p_H = \eta \cdot f \cdot B_s^x \quad [W.kg^{-1}] \quad (9)$$

f kmitočet magnetování železa

B_s maximální hodnota indukce

η konstanta závislá na použitém materiálu

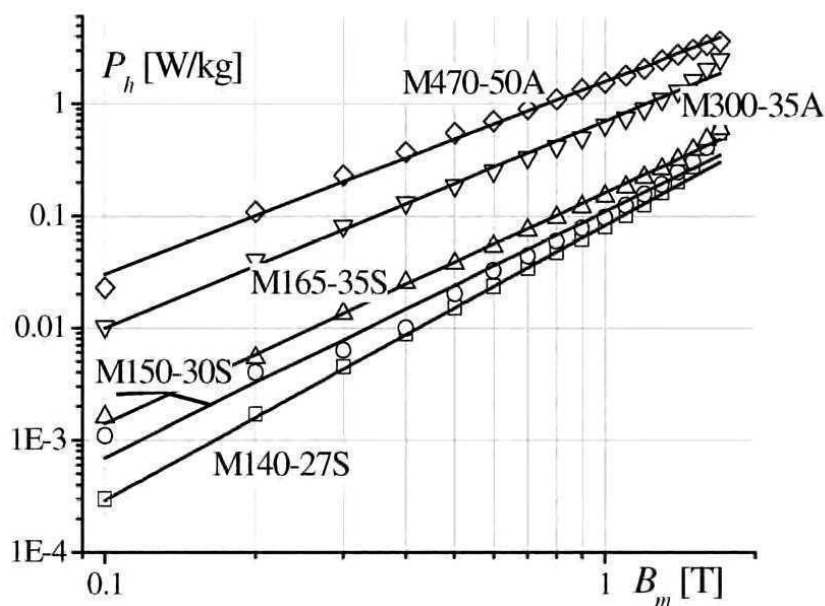
Hysterezní ztráty lze také určit z plochy statické hysterezní smyčky S_H , objemu magnetického jádra V a frekvenci magnetování f . Tento způsob výpočtu hysterezních ztrát je výhodný především proto, že nemusíme znát materiálové konstanty.

$$P_H = V \cdot f \cdot S_{Hs} \quad [W] \quad (10)$$

V objem magnetického materiálu

S_{Hs} plocha statické hysterezní smyčky

Na obrázku 17 jsou uvedeny závislosti měrných hysterezních ztrát u pěti různých průmyslově vyráběných transformátorových plechů. Tyto plechy mají různé jakosti dle normy EN10027-1.



Obrázek 17: Hysterezní ztráty plechů v závislosti na velikosti sycení [7]

4.2.3 Ztráty vířivými proudy

Ztráty vířivými proudy jsou úměrné druhé mocnině tloušťky plechu, kmitočtu, magnetické indukci a dále nepřímo úměrně měrnému odporu a měrné hmotnosti plechu. Tyto ztráty nejsou závislé na zatížení transformátoru a tvoří ztráty na prázdno. V knize

Jezierského [6] a Dufka [8] je uveden následující vztah pro výpočet vířivých ztrát v plechu (11), naproti tomu je v jiné literatuře od Patočky [2] nebo Hampla [8] uveden podobný vztah (12), který se liší jen v konstantě. Odvození vztahu pro výpočet ztrát vířivými proudy je však proveden jen v knize Patočky. Také je v [2] uvedeno, že vztah 12 platí jen pro frekvenci magnetování výrazně nižší než frekvenci mezní f_{mez} . Mezní frekvence je taková frekvence, při které je hloubka vniku rovna polovině tloušťky plechů.

$$p_V = \frac{4}{3} \cdot \frac{l}{\gamma \cdot \rho} \cdot (d \cdot \sigma_k \cdot f \cdot B)^2 \quad [W \cdot kg^{-1}] \quad (11)$$

d tloušťka plechu

l šířka plechu

ρ měrný odpor plechu

γ měrná hmotnost plechu

σ_k činitel tvaru magnetovacího střídavého proudu (pro sinusový průběh 1,11)

$$p_V = \frac{1}{6} \cdot \frac{l}{\gamma \cdot \rho} \cdot (d \cdot \pi \cdot f \cdot B)^2 \quad f \ll f_{mez} \quad [W \cdot kg^{-1}] \quad (12)$$

Tyto ztráty lze určit i pomocí rozdílu plochy statické a dynamické hysterezní smyčky (13).

$$P_V = V \cdot f \cdot (S_{Hd} - S_{Hs}) \quad [W] \quad (13)$$

S_{Hd} plocha dynamické hysterezní smyčky

Při daných hodnotách indukce, frekvence a činitele tvaru můžeme v praxi zmenšit tyto ztráty jen použitím tenčího plechu nebo snížením měrného odporu plechu. Na jejich vzniku se podílí i meziplechová izolace.

V tabulce 2 jsou uvedeny maximální celkové ztráty u různých plechů, které uvádí na svých webových stránkách firma ArcelorMittal Technotrom s.r.o.

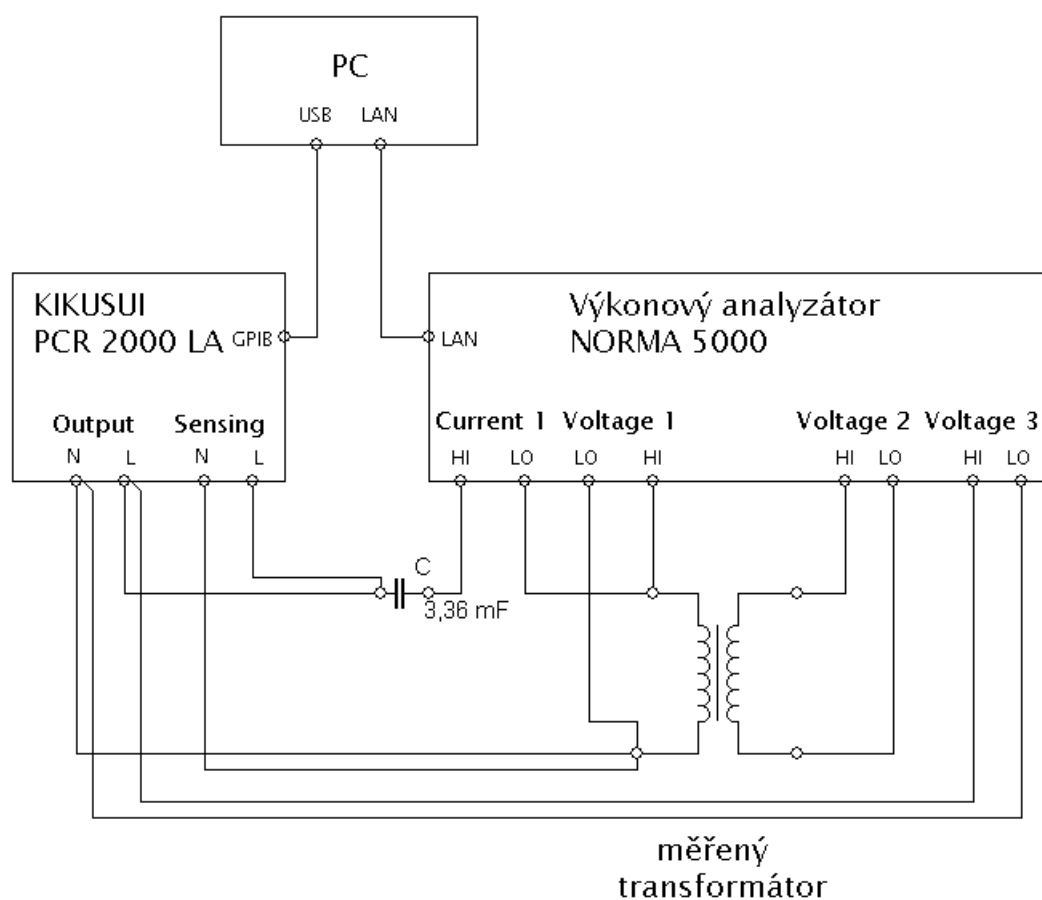
Tabulka 2: Magnetické vlastnosti materiálů a celkové ztráty při frekvenci 50Hz [10]

Jmenovitá tloušťka (mm)	Jakost			Max. měrné ztráty (W/kg)		Min. magnetická indukce(T)
	EN 10107	DIN 46400	AISI	P _{1,5/50Hz}	P _{1,7/50Hz}	B ₈₀₀
0,23	M127 - 23S		23M3	0,8	1,27	1,75
0,27	M140 - 27S	VM 89 - 27N	27M4	0,89	1,40	1,75
0,30	M150 - 30S	VM 97 - 30N	30M5	0,97	1,50	1,75
0,35	M165 - 35S	VM 111 - 35N	35M6	1,11	1,65	1,75
0,23	M110 - 23S			0,73	1,1	1,78
0,23	M120 - 23S			0,77	1,20	1,78
0,27	M - 27S	VM 130 - 27S		0,85	1,30	1,78
0,30	M140 - 30S	VM 140 - 30S		0,92	1,40	1,78
0,35	M150 - 35S	VM 155 - 35S		1,05	1,50	1,78
0,23	M 100 - 23P				1,00	1,85
0,27	M 103 - 27P		27MOH		1,03	1,88
0,30	M 105 - 30P		30MOH		1,05	1,88
0,30	M 111 - 30P	VM 111 - 30P	30M1H		1,11	1,88
0,30	M 117 - 30P	VM 117 - 30P	30M2H		1,17	1,85

5. Měřicí aparatura

5.1 Měření ztrát naprázdno

Pro určení ztrát naprázdno u zkoumaného transformátoru jsem použil měřicí aparaturu (obrázek 18) složenou z programovatelného AC zdroje Kikusui PCR 2000 LA, výkonového analyzátoru Norma 5000 a kondenzátoru. Měřenými veličinami jsou: napětí zdroje, primární proud a napětí a sekundární napětí měřeného transformátoru. Všechny tyto veličiny jsou snímány pomocí analyzátoru Norma 5000.



Obrázek 18: Schéma měřicí aparatury pro měření ztrát naprázdno

Programovatelný zdroj je jednofázový a má výkon 2 kVA. Umožňuje generování téměř libovolného průběhu na výstupních svorkách. Výstupní napětí může mít i definovaný napěťový offset. Zdroj se skládá ze syntezátoru průběhu signálu a rychlého lineárního zesilovače. Pro měření ztrát naprázdno je transformátor napájen síťovým napětím a frekvencí. Použitý analyzátor umožňuje měření až na čtyřech fázích zároveň. Analyzátor je vybaven čtyřmi moduly PP50 s přesností definovanou výrobcem

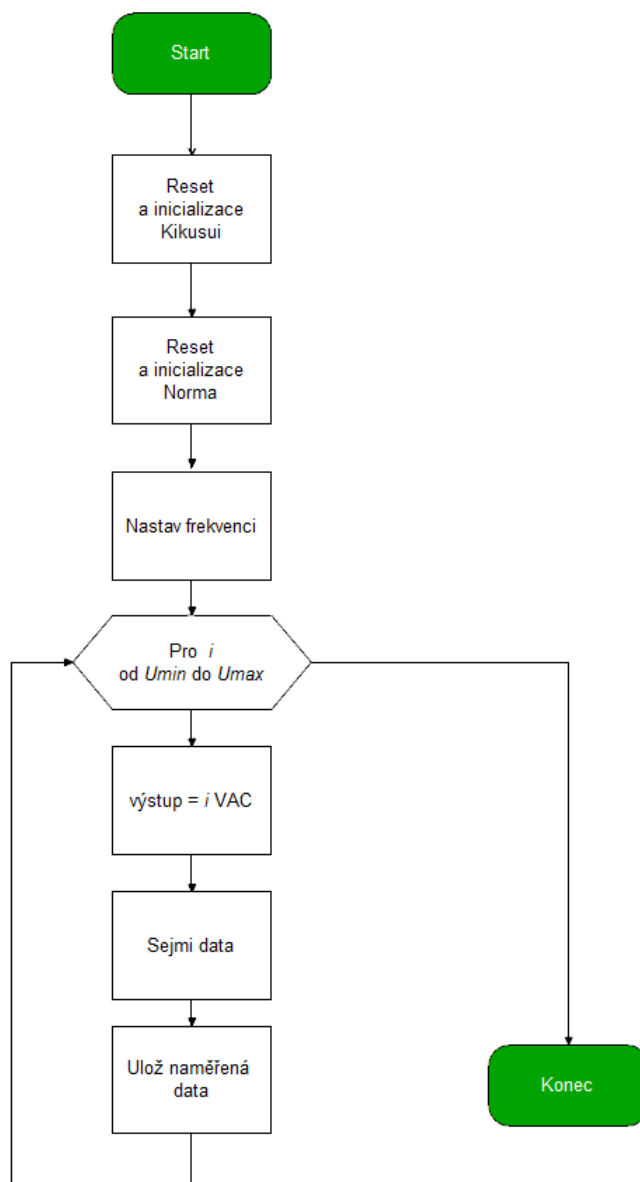
0,05% rd + 0,05 % rg. Každý modul pro měření je vybaven napěťovým a proudovým kanálem. Frekvenční rozsah analyzátoru je od stejnosměrných hodnot napětí a proudu až do signálů o frekvencích řádově MHz. Tento analyzátor tak zcela postačuje požadavkům na měření ztrát na prázdno. Kondenzátor o kapacitě 3,36 mF je v obvodu zapojen z důvodu odstranění stejnosměrné složky napětí zdroje. Kondenzátor je zapojen mezi výstupem zdroje a svorkou kondenzátoru, přičemž svorky Senesing jsou připojeny na svorku kondenzátoru a svorku měřeného transformátoru.

Na obrázku 19 je fotografie zapojené měřicí aparatury a měřeného transformátoru.



Obrázek 19: Fotografie měřicí aparatury ztrát naprázdno

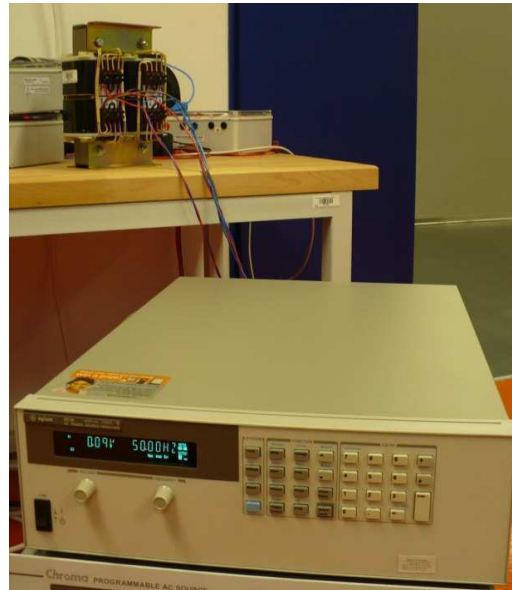
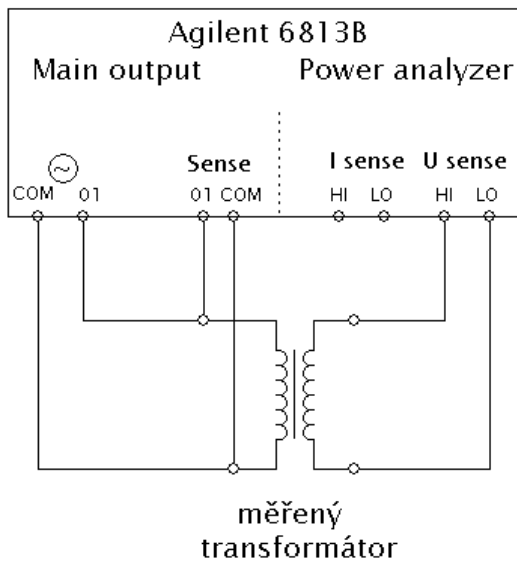
Program, který realizuje vývojový diagram (obrázek 20), je napsán v programu Matlab. Tento skript ukládá data do souboru typu *.mat, kde je uložena matice naměřených hodnot. Tato matice obsahuje i velikost vzorkovací periody, která umožňuje zpětné generování časové osy a časových průběhů měřených hodnot.



Obrázek 20: Vývojový diagram programu pro měření ztrát na prázdko

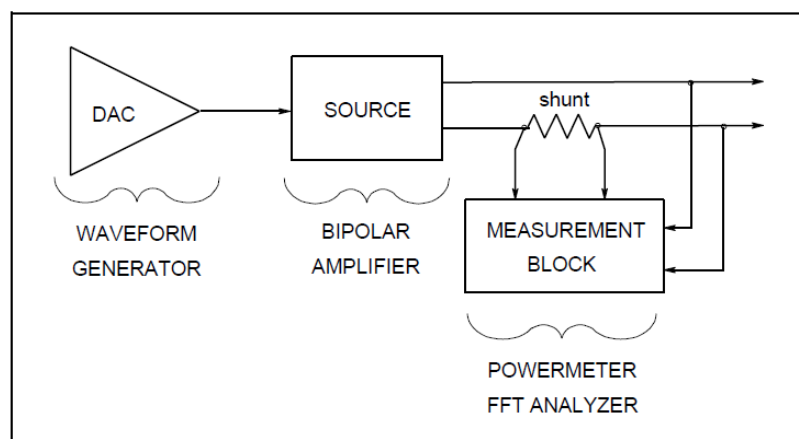
5.2 Měření zapínacího proudu

Měřicí aparatura pro měření zapínacích proudů je tvořena pouze z programovatelného AC zdroje s analyzátozem Agilent 6813B a měřeným transformátorem (obrázek 21).



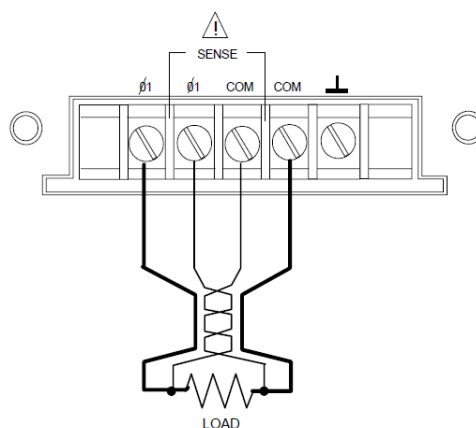
Obrázek 21: Schéma měřicí aparatury pro měření zapínacího proudu a jeho realizace

Tento zdroj umožňuje generování výstupního napětí a proudu dle požadavků měření. Na obrázku 22 jsou zobrazeny funkční bloky, ze kterých je zdroj složen. Obsahuje generátor signálu, bipolární zesilovač a měřicí blok. Vzorkovací perioda je pro signály o frekvenci 45 Hz a vyšší určena pevně výrobcem na 25 μ s.



Obrázek 22: Funkční bloky AC zdroje Agilent 6811B [11]

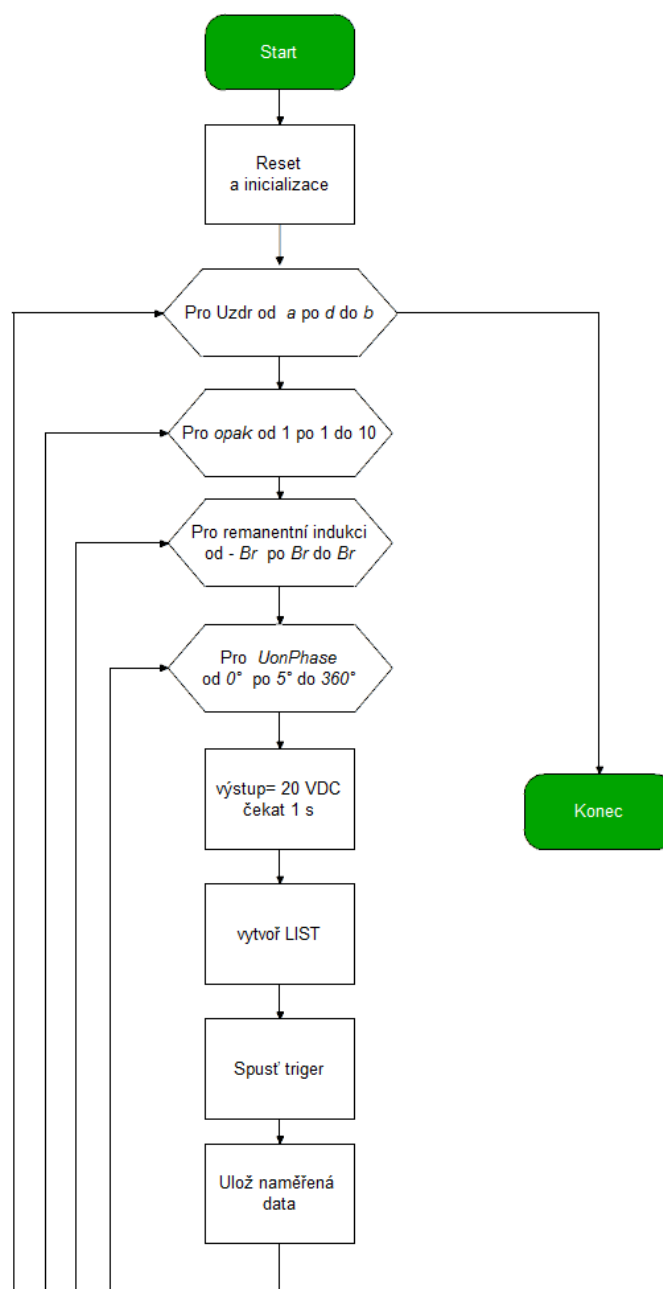
Primární vinutí je připojeno k AC zdroji čtyřmi vodiči dle obrázku 23. Vodiče, které jsou znázorněny tučným písmem, jsou vodiče výkonové. Pro připojení transformátoru k AC zdroji jsem použil vodiče o průřezu 2,5 mm². Ostatní vodiče, které slouží pro měření, mají průřez 0,75 mm². Kroucení vodičů pro měření jsem dle návodu k použití [11] také dodržel a to z důvodu snížení rušení.



Obrázek 23: Schéma připojení vzorku k AC zdroji Agilent 6813B [11]

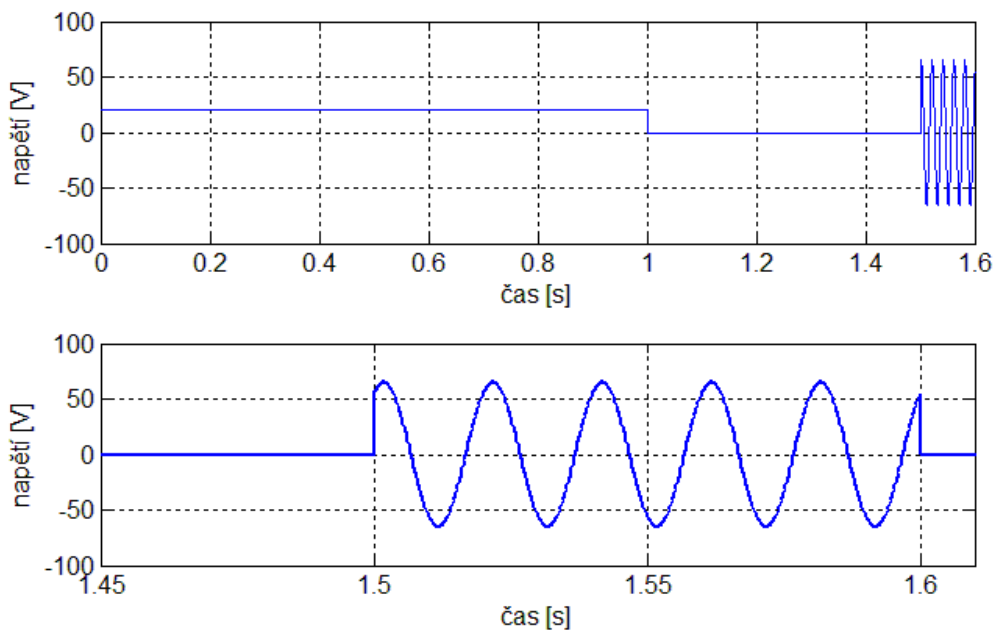
Použitý zdroj má proudové omezení pro opakovatelný pulz 80 A, proto nemohly být mapy zapínacích proudů měřeny pro síťové napětí 230 V. Velikost napětí jsem volil podle materiálu jádra tak, aby nebylo překročeno proudové omezení s ohledem na možnost porovnání map zapínacích proudů.

Programovatelný zdroj je připojen k rozhraní GPIB, které ho propojuje s počítačem. Zdroj jsem ovládal pomocí programu Matlab. Vývojový diagram na obrázku 24 popisuje měřicí program, který ovládá programovatelný zdroj Agilent 6813B. Nejdříve se provede inicializace měřicího přístroje, po té se nastaví napětí, které se ve smyčce mění. Měření se pro každé napětí provede 10krát. Velikost zapínacího proudu jsem změřil v různých úhlech připojení napájecího napětí s krokem 5°. Transformátor jsem nejdříve nechal 1 s připojený ke stejnosměrnému napětí pro získání definované remanentní magnetizace jádra. Měření jsem provedl pro dvě maximální hodnoty remanentní indukce jádra připojením k ± 20 V stejnosměrných následované nulovou hodnotou napětí po dobu 0,5 s. Další obdobnou variantou vzniku remanentní indukce je řízené vypnutí napájení transformátoru v 0 a 180° a jeho opětovné připojení v krátkém okamžiku. Tato varianta je reálná i při normálním provozu, kdy může dojít ke krátkodobému výpadku napájení. Po odeslání příkazu *TRG se provede sejmутí 4096 vzorků požadovaných veličin. Naměřená data se ukládají do souboru typu *.mat. Pro realizaci části z uvedeného postupu jsem využil mód LIST. Tento mód umožňuje synchronní generování přechodových signálů na výstupu zdroje. Tím je zaručeno přesné generování úhlu připojení měřeného transformátoru k požadovanému napětí.



Obrázek 24: Vývojový diagram programu pro měření zapínacích proudů

Vzhledem k tomu že použitý zdroj trpí značným napěťovým offsetem, bylo nutné ho alespoň částečně eliminovat. Proto se ještě před samotným generováním LIST provede měření výstupního napětí při nastaveném nulovém výstupním napětí. Tato hodnota je poté použita pro nastavení korekčního offsetu výstupního napětí v opačné polaritě. Příklad generovaného průběhu napětí je na následujícím obrázku 25.



Obrázek 25: Příklad generovaného průběhu napětí z programovatelného zdroje a analyzátoru Agilent 6813B, nahore celý průběh, dole detail připnutí v požadovaném úhlu

6. Měření vzorky transformátorů

Měření jsem prováděl na transformátoru o velikosti RJV 1,6, který vyrábí firma SVED Liberec. Jedná se o oddělovací transformátor se jmenovitým napětím 230 V. Tento transformátor má typový výkon 1 200 VA, který může být i nižší v případě použití jiné cívky se slabším průřezem vodiče. Pro experiment byly vybrány tři materiály jádra transformátoru: M165-35S, M400-50A a M530-50A a dvě cívky: 500 VA a 1 200 VA.



Obrázek 26: Fotografie měřeného transformátoru RJV 1,6



Obrázek 27: Fotografie měřeného transformátoru, s detailem vzduchové mezery

Na obrázku 27 je vidět jak je provedeno skládání plechů jednotlivých plechů, které dohromady tvoří jádro transformátoru. Plechy jsou skládány střídavě po 5 kusech. Na fotografii je vidět i vzduchová mezera, která při tomto způsobu skládání plechů vznikne.

6.1 Plechy M165-35S

Jedná se o orientované plechy od firmy Waasner označované dle normy EN10027-1 M165-35S. Plechy s označením S mají dle normy sníženou ztrátu a jsou anizotropní. Tloušťka plechů je 0,35 mm. Rozměr plechů má označení UI132. Základní magnetické vlastnosti těchto plechů jsou uvedeny v následující tabulce 3.

Tabulka 3: Tabulka významných vlastností plechů M165-35S [12]

tloušťka [mm]	hysterezní ztráty při 50 Hz [W/kg]		magnetická indukce [T] při 800 A/m
	1,5 T	1,7 T	
0,35	1,11	1,65	1,75

Pro určení ztrát naprázdno v jednotkách $W \cdot kg^{-1}$ je potřeba znát přesně hmotnost magnetických plechů použitých při skládání jádra. Proto jsem provedl měření hmotnosti plechů na digitální váze KERN 440-49 N. Použitá váha má maximální rozsah 4000 g, proto jsem jádro rozdělil při vážení na tři díly. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4. Měření jsem prováděl dvakrát, pro další výpočty jsem uvažoval naměřenou hmotnost za 7694 g. Fotografie pracoviště při vážení hmotnosti jader je zobrazena na následujícím obrázku 28.



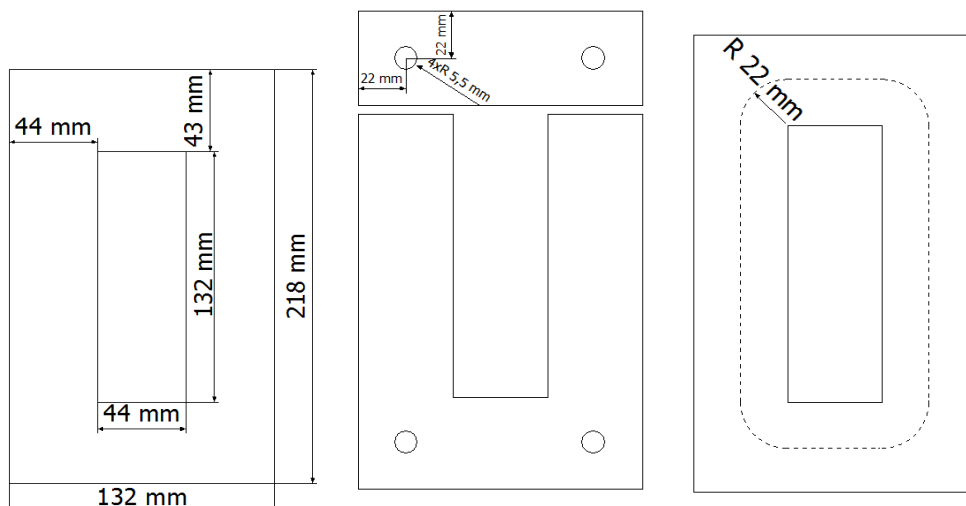
Obrázek 28: Fotografie použité digitální váhy při měření hmotnosti jádra

Tabulka 4: Tabulka naměřených hodnot hmotnosti jádra M165-35S

Hmotnost plechů M165 [g]		
	1. měření	2. měření
část 1.	3098,5	3098,3
část 2.	2837,3	2837,4
část 3.	1758,0	1758,0
suma	7693,8	7693,7

Pro výpočet ztrát naprázdno pomocí plochy hysterezní smyčky je nutné znát rozměry magnetického obvodu. Na obrázku 29 jsou uvedeny rozměry magnetických plechů a aproximovaná střední siločára magnetické intenzity. Aproximace uvažuje kruhový tvar siločáry v rozích materiálu o poloměru 22 mm. Délka střední siločáry je 490 mm (14). Jádro transformátoru je složeno z plechů s uvažovaným průřezem 19,8 cm² po celé délce střední siločáry.

$$l_s = 2 \cdot \pi \cdot 22 + 2 \cdot 44 + 2 \cdot 132 = 490 \text{ mm} \quad (14)$$



Obrázek 29: Rozměry magnetických plechů (vlevo a uprostřed), střední siločára (vpravo)

6.3 Plechy M400-50A

Dalším zkoumaným materiálem byl typ s označením M400-50A. Tloušťka plechů je 0,5 mm. Rozměry plechů jsou stejné jako u předchozího typu M165-35S. Základní magnetické vlastnosti těchto izotropních plechů jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Tabulka významných vlastností plechů M400-50A [12]

tloušťka [mm]	hysterezní ztráty při 50 Hz [W/kg]		magnetická indukce [T] při			anizo- tropie [%]	hustota [kg/dm ³]
	1,5 T max.	1,0 T	2500 A/m	5000 A/m	10000 A/m		
0,5	4,00	1,70	1,53	1,63	1,73	± 12	7,70

Naměřené hodnoty hmotnosti jádra složeného z materiálu M400-50A jsou uvedeny v následující tabulce 6. Pro další zpracování dat jsem uvažoval hmotnost tohoto jádra za 7824,2 g.

Na obrázku 27 je vidět jak je provedeno skládání plechů jednotlivých plechů, které dohromady tvoří jádro transformátoru. Plechy jsou skládány střídavě po 5 kusech. Na fotografii je vidět i vzduchová mezera, která při tomto způsobu skládání plechů vznikne.

Tabulka 6: Tabulka naměřených hodnot hmotnosti jádra M400-50A

Hmotnost plechů M400 [g]		
	1. měření	2. měření
část 1.	1866,4	1866,7
část 2.	3168,2	3168,4
část 3.	2789,3	2789,3
suma	7823,9	7824,4

6.2 Plechy M530-50A

Tyto plechy vyrábí stejná firma jako předchozí vzorky s označením M530-50A. Tloušťka plechů je 0,5 mm. Rozměry plechů jsou stejné jako u předchozích typů. Základní magnetické vlastnosti těchto izotropních plechů jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Tabulka významných vlastností plechů M530-50A [12]

tloušťka [mm]	hysterezní ztráty při 50 Hz [W/kg]		magnetická indukce [T] při			anizo- tropie [%]	hustota [kg/dm ³]
	1,5 T max.	1,0 T	2500 A/m	5000 A/m	10000 A/m		
0,5	5,30	2,30	1,56	1,65	1,75	± 10	7,70

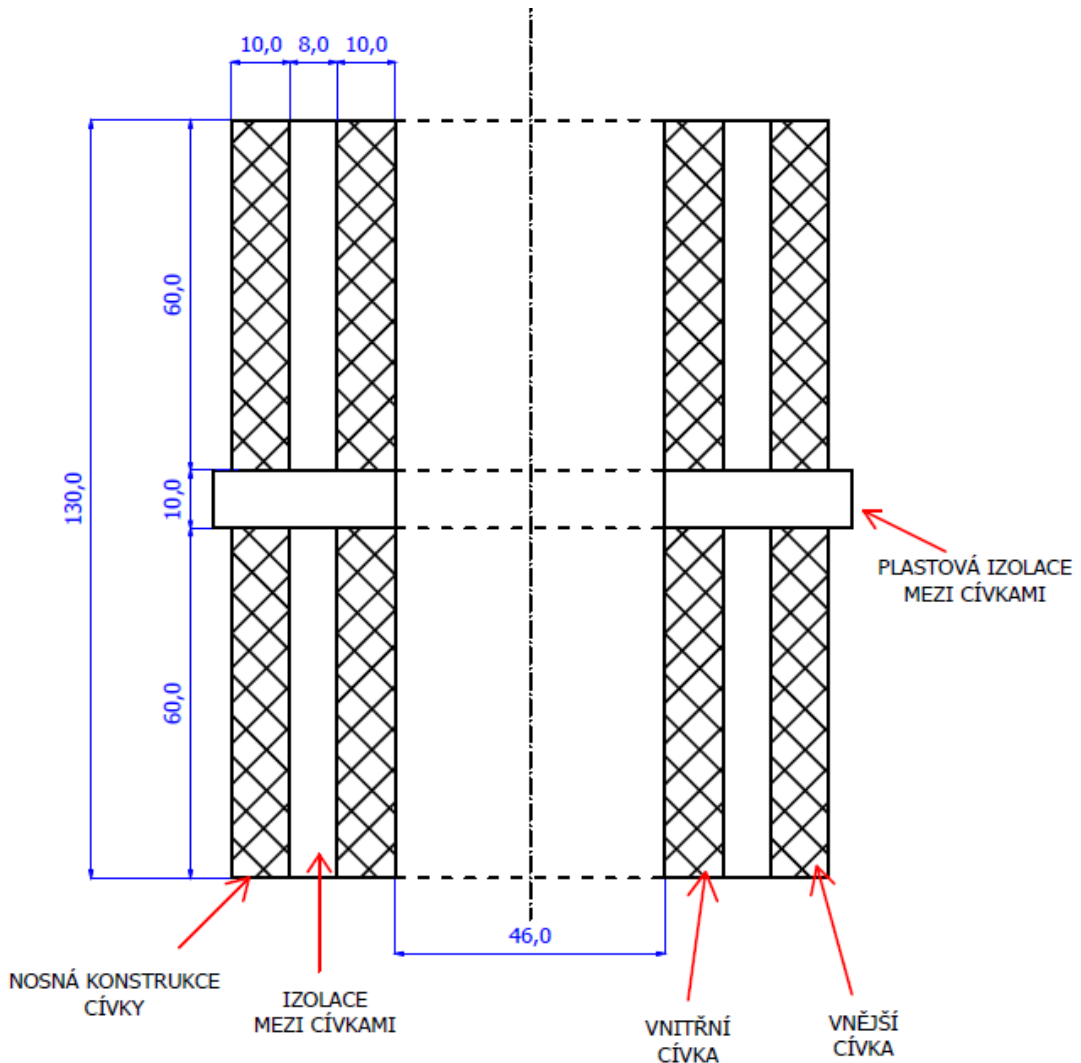
Naměřené hodnoty hmotnosti jádra složeného z materiálu M530-50A jsou uvedeny v tabulce 8. Pro další zpracování dat jsem uvažoval hmotnost tohoto jádra za 7675 g.

Tabulka 8: Tabulka naměřených hodnot hmotnosti jádra M530-50A

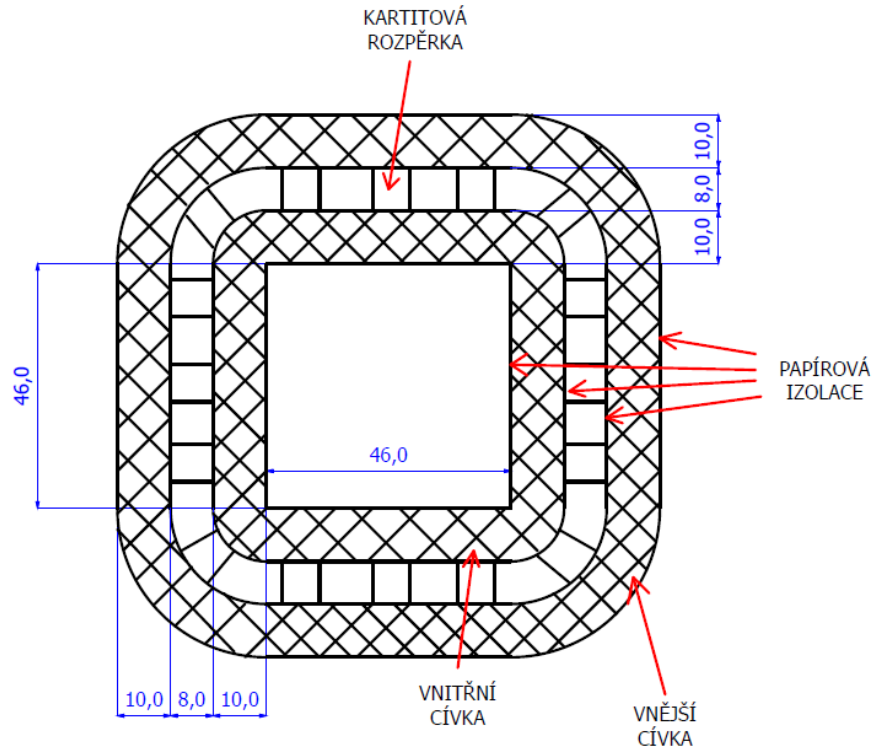
Hmotnost plechů M530 [g]		
	1. měření	2. měření
část 1.	2141,0	2141,0
část 2.	3231,6	3231,6
část 3.	2302,2	2302,2
suma	7674,8	7674,8

6.4 Cívka 500 VA

Cívky transformátoru jsou rozděleny na 4 části, na každém sloupku (levý a pravý z čelního pohledu) jsou umístěny 2 cívky. Mezi vnitřním označeno jako primární a vnějším označené jako sekundární vinutím jsou umístěny kartitové rozpěrky o tloušťce 8 mm a papírová izolace. Rozměry a konstrukce jednoho sloupku jsou znázorněny na obrázku 30 a 31. Nosná konstrukce cívky má označení UI132/46. Každá z cívek má 80 závitů, celkový počet závitů na primárním i sekundárním vinutí je 320. Průměr vodiče, ze kterého je navinuto primární i sekundární vinutí, má průřez $1,25 \text{ mm}^2$.



Obrázek 30: Narys cívky 500 VA



Obrázek 31: Půdorys cívky 500 VA

Pro přesné definování použité cívky jsem provedl měření na RLC metru HIOKI 3522-50. Měřenými veličinami byly indukčnost, odpor, jakost a účinník při frekvenci 50, 500 a 5000 Hz a napětí 2,5 V. Výsledky toho měření jsou v tabulce 9 a 10.

Tabulka 9: Tabulka naměřených parametrů levého sloupku cívky 500 VA

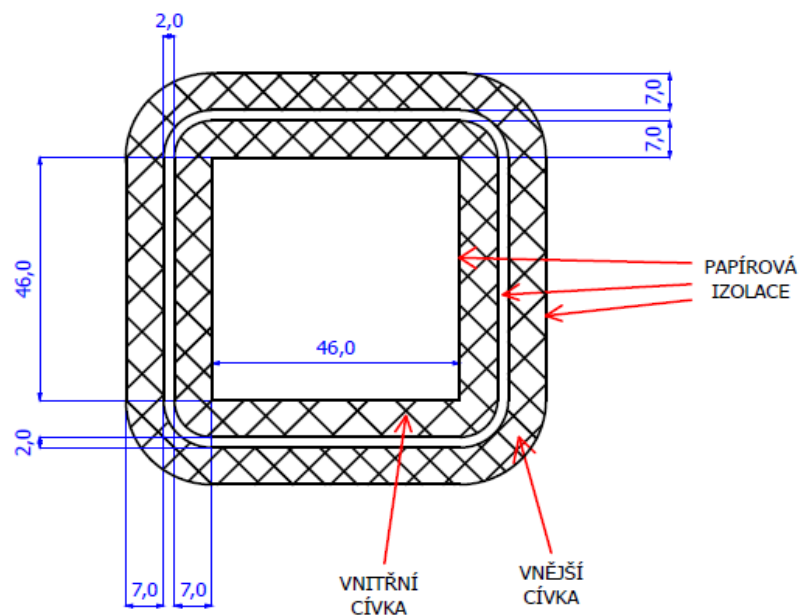
	primární	sekundární	cívky sériově	cívky antisériově
f = 50 Hz				
Ls [μH]	634	1148	2885	656
Rs [$\text{m}\Omega$]	475	637,2	1184	1117
Q	0,42	0,57	0,77	0,19
φ [$^\circ$]	22,8	29,55	37,45	10,46
f = 500 Hz				
Ls [μH]	631,9	1144	2892	658,2
Rs [$\text{m}\Omega$]	476,9	642	1195	1120
Q	4,16	5,6	7,6	1,85
φ [$^\circ$]	76,49	79,87	82,51	61,56
f = 5000 Hz				
Ls [μH]	631,7	1142	2886	656,7
Rs [$\text{m}\Omega$]	631	1158	2205	1453
Q	31,42	30,9	41,1	14,19
φ [$^\circ$]	88,18	88,15	88,61	85,97

Tabulka 10: Tabulka naměřených parametrů pravého sloupku cívky 500 VA

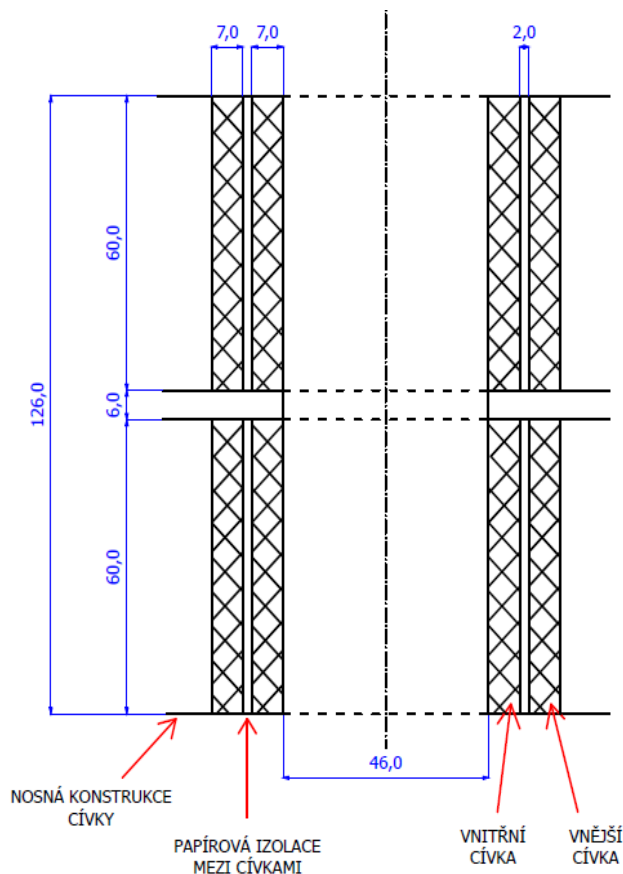
	primární	sekundární	cívky sériově	cívky antisériově
f = 50 Hz				
Ls [μH]	638	1169	2915	669,4
Rs [$\text{m}\Omega$]	477,7	639,7	1142	1120
Q	0,42	0,57	0,8	0,19
φ [$^\circ$]	22,74	29,86	38,73	10,6
f = 500 Hz				
Ls [μH]	632,8	1164	2921	669,2
Rs [$\text{m}\Omega$]	478,7	646	1154	1124
Q	4,15	5,66	7,95	1,87
φ [$^\circ$]	76,46	79,98	82,83	61,86
f = 5000 Hz				
Ls [μH]	632,6	1162	2915	667,7
Rs [$\text{m}\Omega$]	633	11,73	2173	1460
Q	31,37	31,14	42,13	14,36
φ [$^\circ$]	88,17	88,16	88,64	86,02

6.5 Cívka 1200 VA

Tato cívka využívá také nosnou konstrukci s označením UI12/46. Vinutí je provedeno z vodiče o průřezu $1,9 \text{ mm}^2$. Počet závitů je stejný jako v případě cívky 500 VA. Izolace mezi vnitřním a vnějším vinutím je provedena izolačním papírem.



Obrázek 32: Půdorys cívky 1200 VA



Obrázek 33: Nárýs cívky 1200 VA

Tato cívka byla také změřena RLC metrem za stejných podmínek. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách 11 a 12.

Tabulka 11: Tabulka naměřených parametrů levého sloupku cívky 1200 VA

	primární	sekundární	cívky sériově	cívky antisériově
f = 50 Hz				
Ls [μH]	637	998	2882	379
Rs [$\text{m}\Omega$]	217	318,3	486	489
Q	0,92	0,99	1,86	0,24
φ [$^\circ$]	42,72	44,52	61,68	13,6
f = 500 Hz				
Ls [μH]	637	989	2875	376
Rs [$\text{m}\Omega$]	227	358	543	507
Q	8,8	8,69	16,63	2,33
φ [$^\circ$]	83,5	83,44	86,56	66,76
f = 5000 Hz				
Ls [μH]	627	953	2808	351
Rs [$\text{m}\Omega$]	886	2758	5056	2108
Q	22,22	10,86	17,44	5,24
φ [$^\circ$]	87,42	87,74	86,72	79,19

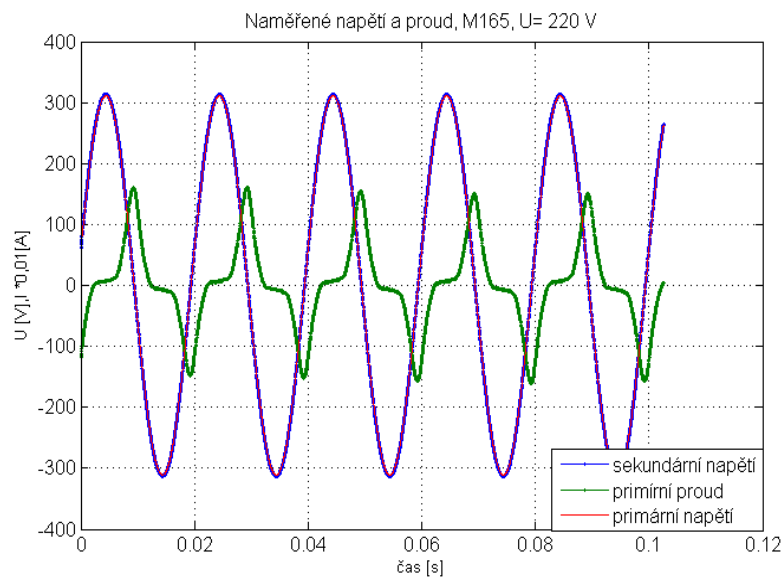
Tabulka 12: Tabulka naměřených parametrů pravého sloupku cívky 1200 VA

	primární	sekundární	cívky sériově	cívky antisériově
f = 50 Hz				
Ls [μH]	641	995	2879	384,6
Rs [$\text{m}\Omega$]	225	262,9	483,9	480,8
Q	0,89	1,19	1,88	0,25
φ [$^\circ$]	41,9	50	62,1	14,01
f = 500 Hz				
Ls [μH]	636	995	2885	380,6
Rs [$\text{m}\Omega$]	231,8	293	540	500
Q	8,63	10,67	16,78	2,39
φ [$^\circ$]	83,39	84,65	86,59	67,3
f = 5000 Hz				
Ls [μH]	627,4	960	2818	356
Rs [$\text{m}\Omega$]	883	2680	5028	2084
Q	22,32	11,26	17,61	5,37
φ [$^\circ$]	87,44	84,92	86,75	79,45

7. Vyhodnocení naměřených dat

7.1 Ztráty naprázdno

Z naměřených hodnot primárního proudu i a sekundárního napětí u jsem pomocí programu Matlab vypočítal magnetickou indukci B dle vztahu 16. Typický průběh primárního a sekundárního napětí a magnetizačního proudu je uveden na následujícím obrázku 34. Měření jsem provedl pro různá primární napětí při frekvenci 50 Hz.



Obrázek 34: Naměřené hodnoty napětí a primárního proudu, M165, $U_{zdr} = 220 \text{ V}$

Rovnice 17 vznikla dosazením rovnice 16 do rovnice 15 za předpokladu zanedbání rozptylových toků. Integraci jsem při výpočtech nahradil kumulativní sumou přes naměřené vzorky. Periodu vzorkování jsem označil T_S .

$$u_i = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (15)$$

$$\phi = \int_s B \cdot dS \quad (16)$$

$$B = -\frac{1}{N \cdot S} \cdot \int u_i \cdot dt + B_0 \quad (17)$$

$$B = -\frac{1}{N \cdot S} \cdot \sum_n u_i \cdot T_S + B_0 \quad (18)$$

u_i indukované sekundární napětí naprázdno

N počet závitů primární i sekundární cívky

Φ indukční tok

B	magnetická indukce
B_0	počáteční magnetická indukce
S	průřez jádra transformátoru
T_s	perioda vzorkování
n	jednotlivé naměřené vzorky

Integrační konstanta B_0 je rovna počáteční indukci, od které začal výpočet kumulativní sumací navzorkovaných dat. Integrační konstantu jsem určil pomocí centrování hysterezních smyček.

Magnetickou intenzitu H jsem vypočítal pomocí rovnice 21, která je zjednodušením Ampérova zákona (19). Toto zjednodušení předpokládá konstantní intenzitu po celé střední siločáře.

$$\oint Hdl = \sum i \quad (19)$$

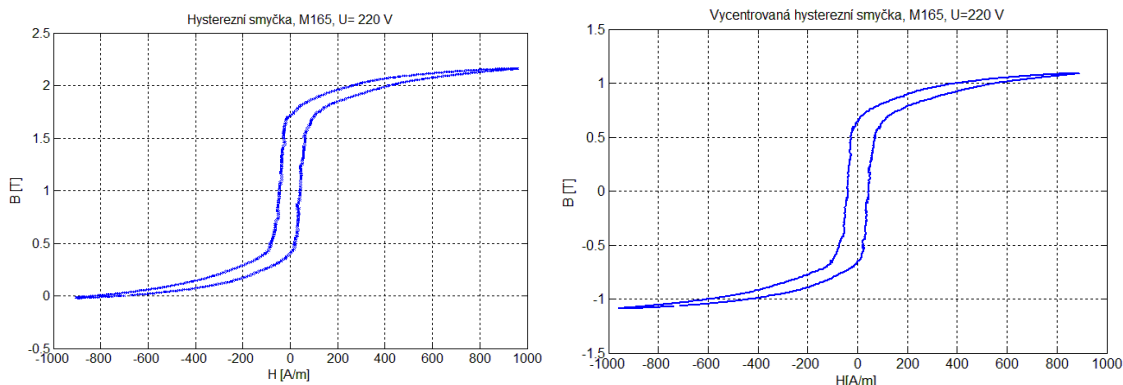
$$H \cdot l_s = N \cdot i \quad (20)$$

$$H = \frac{N \cdot i}{l_s} \quad (21)$$

H	intenzita magnetického pole
i	primární proud naprázdno
l_s	délka střední siločáry

Horizontální centrování jsem uskutečnil posunutím o rozdíl vzdálenosti minimální a maximální hodnoty magnetické indukce. Centrování hysterezní smyčky ve směru magnetické intenzity jsem provedl posunutím smyček tak, aby koercitivní intenzita byla stejná pro kladnou i zápornou polaritu magnetické intenzity.

Z vypočtených hodnot střední magnetické indukce a intenzity jsem mohl zobrazit dynamickou hysterezní smyčku, typický průběh je na obrázku 35. Na následujícím obrázku je také vidět vliv centrování hysterezní smyčky. Hysterezní smyčky pro každý měřený materiál jádra transformátoru jsou uvedeny v příloze 9.2.



Obrázek 35: Typická dynamická hysterezní smyčka, M165, $U_{zdr}= 220$ V, vlevo před centrováním, vpravo po centrování

V další kroku jsem již mohl spočítat plochu dynamické hysterezní smyčky.

$$S_{Hd} = \oint H \cdot dB \quad (22)$$

$$S_{Hd} = \sum_n H_n \cdot \Delta B_n \quad (23)$$

S_{Hd} plocha dynamické hysterezní smyčky

Pro výpočet plochy jsem vybral jednu periodu (23). Pro zjištění ztrát naprázdno jsem použil vztah (10). V tomto vztahu pro výpočet hysterezních ztrát však figuruje plocha statické hysterezní smyčky. Po dosazení plochy dynamické hysterezní smyčky za statickou lze získat celkové ztráty (24), v nichž jsou zahrnuté jak hysterezní ztráty, tak i ztráty vířivými proudy.

$$P_{BH} = \frac{S_{Hd} \cdot V \cdot f}{m} \quad (24)$$

P_{BH} ztráty naprázdno určené pomocí hysterezní smyčky [$W \cdot kg^{-1}$]

V objem jádra transformátoru

f frekvence

m hmotnost jádra transformátoru

Ztráty naprázdno lze také vypočítat přímo z naměřených hodnot primárního proudu a napětí na sekundární cívice dle vzorce (25) resp. (26). To odpovídá střednímu výkonu na příčných prvcích náhradního obvodu transformátoru (obrázek 2).

$$P_{Ul} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u \cdot i \cdot dt \quad (25)$$

$$P_{UI} = \frac{1}{T} \cdot \sum_n u_n \cdot i_n \cdot T_s \quad (26)$$

$$p_{UI} = \frac{P_{UI}}{m} \quad (27)$$

P_{UI}	ztráty naprázdno určené pomocí primárního proudu a sekundárního napětí naprázdno [W]
p_{UI}	ztráty naprázdno určené pomocí primárního proudu a sekundárního napětí naprázdno vztažené na jednotku hmotnosti [W.kg ⁻¹]
T	perioda [s]

K vypočteným hodnotám celkových ztrát naprázdno pomocí součinu proudu a napětí jsem určil i nejistoty měření dle následujícího postupu. Standardní nejistota typu a je určena z rozptylu vypočtených hodnot ztrát pro čtyři periody proudu a napětí. Výsledek je vzhledem k malému počtu opakování rozšířen o koeficient Studentova rozdělení pro 95% kvantil o hodnotě 3,1824.

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{k \cdot (k - 1)}} \cdot q \quad (28)$$

u_a	standardní nejistota typu a
x_i	naměřená hodnota
\bar{x}	aritmetický průměr naměřených hodnot
k	počet měření
q	rozšiřující koeficient Studentova rozdělení o hodnotě 3,1824

Chyby měřicího přístroje NORMA jsou dle katalogu pro měření proudu i napětí 0,05 % z naměřené hodnoty + 0,05 % z měřicího rozsahu. Měřicí rozsahy jsou pro napětí: 0.3, 1, 3, 10, 30, 100, 300 a 1000 V , pro měření proudu: 0.03, 0.1, 0.3, 1, 3 a 10 A. Za hodnotu RDG jsem dosazoval průměr efektivních hodnot proudu a napětí. Měřicí rozsah se při měření automaticky mění dle potřeby. Hodnotícím kritériem pro změnu rozsahu je překročení maximální hodnoty měřené veličiny pro daný rozsah, přičemž rozsahy jsou uvedeny v efektivních hodnotách. Hodnotu RG jsem vybíral z možných

rozsahů podle amplituda měřené veličiny podělené odmocninou ze dvou. Při měření dále ještě dochází k přetěžování měřicího rozsahu o 20 až 50 %. Ve výpočtu jsem proto zvolil velikost přetěžování 30 %.

$$u_{bi} = \frac{r\% \cdot RDG + s\% \cdot RG}{\Theta} \quad (29)$$

r	procentuální chyba z odečtené hodnoty
s	procentuální chyba z měřicího rozsahu
u_{bi}	standardní nejistota typu <i>b</i> od <i>i</i> -tého zdroje chyb
Θ	charakterizuje pravděpodobnostní rozdělení chyb, zvolil jsem hodnotu $\sqrt{3}$ (základní výstupní kontrola výrobce)
RDG	naměřená hodnota, resp. efektivní hodnota
RG	měřicí rozsah

Standardní nejistota typu *b* je pro nepřímá měření dána následujícím vztahem. I_{ef} a u_{ef} jsou efektivní hodnoty proudu a napětí z každé periody a jejich průměry jsou označeny s pruhem.

$$u_b = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{VI}}{\partial u} \cdot \Delta u\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{VI}}{\partial i} \cdot \Delta i\right)^2} = \sqrt{\left(\overline{i_{ef}} \cdot \Delta u\right)^2 + \left(\overline{u_{ef}} \cdot \Delta i\right)^2} \quad (30)$$

u_b	standardní nejistota typu <i>b</i>
Δu	chyba měření sekundárního napětí
Δi	chyba měření primárního proudu
$\overline{u_{ef}}$	průměr efektivních hodnot sekundárního napětí
$\overline{i_{ef}}$	průměr efektivních hodnot primárního proudu

$$e = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (31)$$

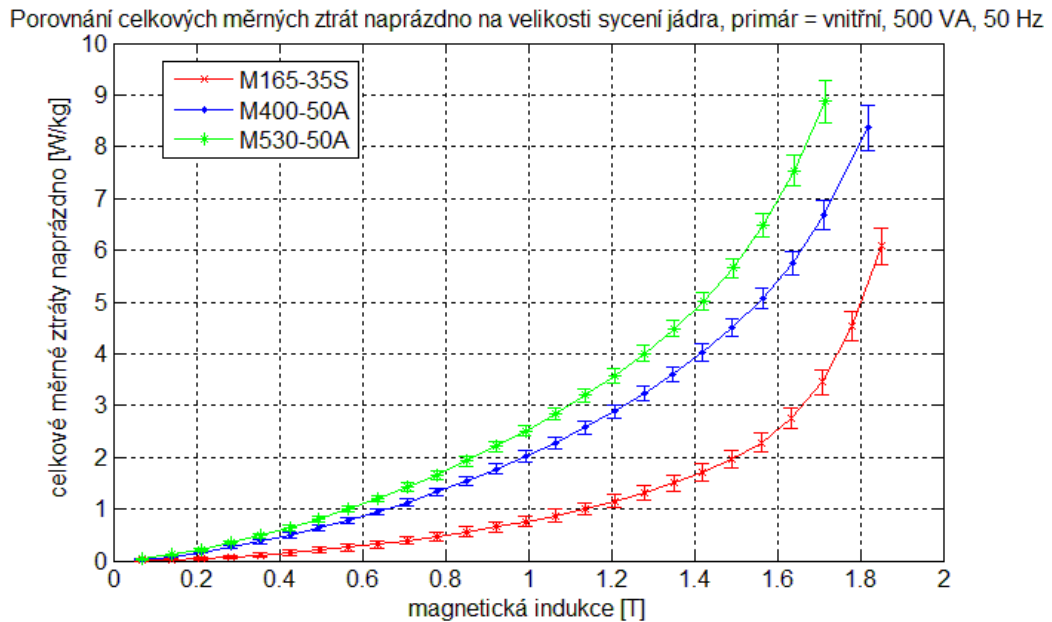
e kombinovaná standardní nejistota

$$E = k_u \cdot e \quad (32)$$

E rozšířená standardní nejistota

k_u koeficient rozšíření pro pravděpodobnost výskytu správné hodnoty v daném intervalu 95 % je $k_u = 2$

Vypočtené hodnoty celkových ztrát naprázdno s chybovými úsečkami pro každý z měřených magnetických materiálů jsou uvedeny na obrázku 36. Měření bylo pro vzorky s materiálem jádra M165-35S, M530-50A a M400-50A provedeno s použitím cívky 500 VA.

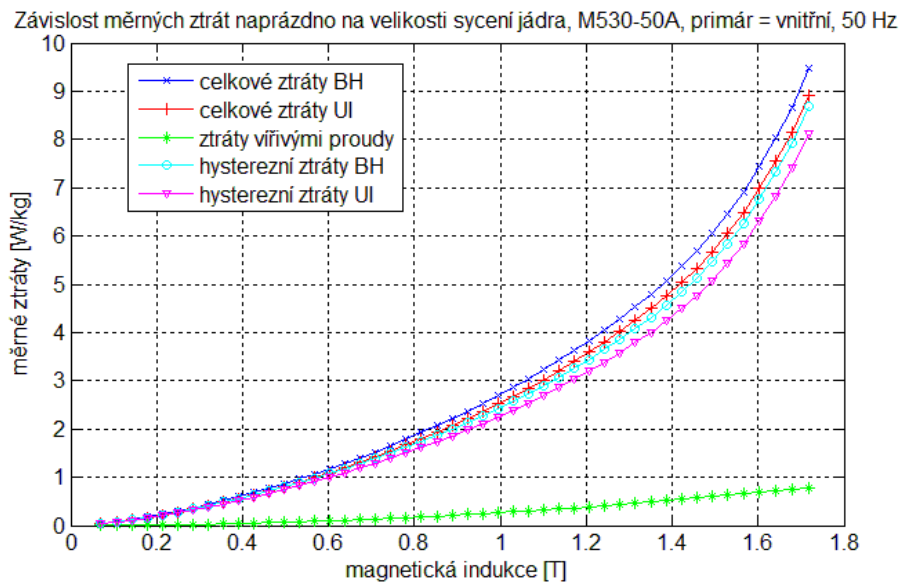


Obrázek 36: Závislost celkových měrných ztrát na prázdko na velikosti sycení jádra pro zkoumané materiály, 500 VA

7.1.1 Rozdělení ztrát naprázdno

Dále jsem pomocí vztahu 12 určil ztráty vířivými proudy v magnetickém jádru transformátoru. Tloušťka plechů použitá pro výpočet je uvedena v tabulce 3, 5 a 7. Objemová hustota je v případě materiálu M400-50A a M530-50A také uvedena v tabulce 5 a 7. Hustotu pro materiál M165-35A jsem v dokumentaci výrobce nenašel, proto jsem pro výpočet použil stejnou hodnotu jako pro materiál M530-50A. Odečtením vířivých ztrát od celkových ztrát naprázdno jsem získal hysterezní ztráty při zanedbání ztrát anomálií. Anomální ztráty popisuje Jezierski v [6]. Na obrázku 37 je graf závislosti celkových ztrát naprázdno, hysterezních a vířivých ztrát na velikosti sycení jádra pro materiál M530-50A. Při napájení transformátoru $U=230$ V a 50 Hz, které odpovídá pracovní indukci 1,64 T, jsou celkové ztráty naprázdno přibližně 8 W/kg. Ztráty vířivými proudy 0,7 W/kg a hysterezní ztráty 7,3 W/kg. V grafu jsou vyneseny jak ztráty vypočtené pomocí plochy hysterezní křivky tak ztráty určené pomocí integrace napětí a proudu. Ztráty naprázdno rostou s velikostí sycení magnetického jádra. Ztráty vypočtené pomocí plochy hysterezní smyčky jsou nižší než ztráty určené integrací

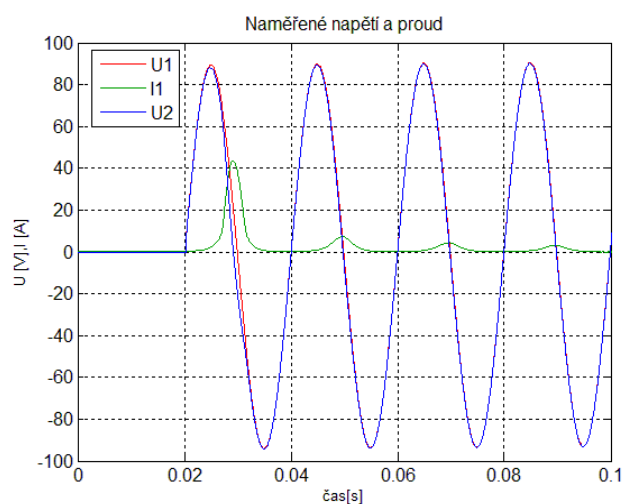
proudu a napětí. Rozdílnost výsledků může být způsobena v nepřesnosti identifikace parametrů transformátoru (délka střední siločáry, průřez jádra). Pro ostatní materiály jádra jsou tyto grafy uvedeny v příloze 9.3.



Obrázek 37: Závislost ztrát na prázdno na velikosti sycení jádra, BH pomocí plochy hysterezní křivky, UI pomocí integrace součinu napětí a proudu

7.2 Zapínací proud

Na obrázku 38 je typický průběh zapínacího proudu. Zapínací proud zde dosáhl hodnoty 43 A. Zapínací proud je rychle tlumen a po několika periodách už dosahuje jmenovitých hodnot. Trvalý jmenovitý proud toho transformátoru má hodnotu 5,2 A.



Obrázek 38: Průběh zapínacího proudu při počáteční indukci $B_0 = 0,4$ T, fáze připnutí 180°

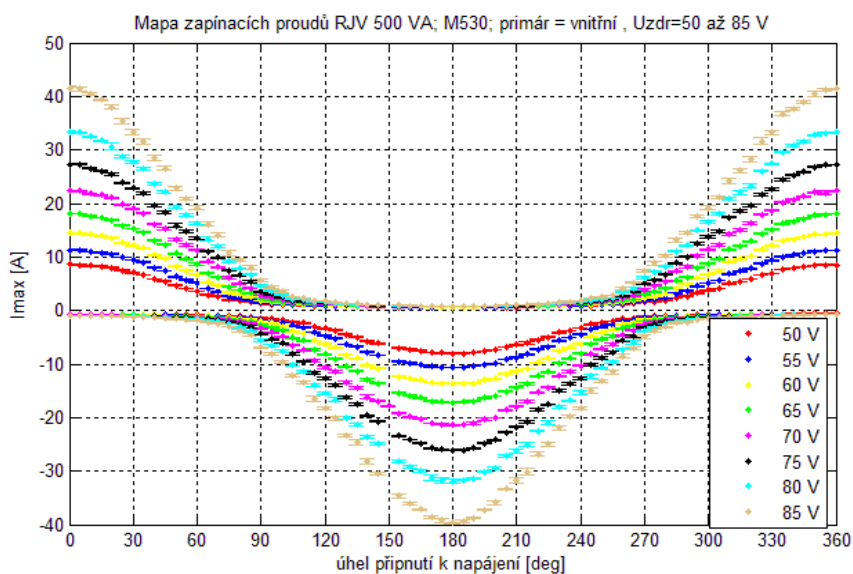
Na obrázku 39 jsou zobrazeny mapy zapínacích proudů měřeného transformátoru. Měření jsem provedl opakovaně (10krát) při stejných podmínkách. V uvedených mapách jsou vykresleny průměry naměřených maxim zapínacích proudů s chybovými úsečkami vymežující rozšířenou nejistotu měření s pravděpodobností 95 %. Velikost koeficientu rozšíření jsem zvolil 2, což odpovídá pravděpodobnosti výskytu 95 %. Rozšířenou nejistotu měření jsem vypočetl dle následujícího postupu. Nejistota typu a je dána závislá na naměřených hodnotách a jejich počtu, klesá s počtem měření. Nejistota typu b je závislá na použitém měřicím přístroji a jeho přesnosti. Výrobce použitého analyzátoru uvádí v dokumentaci přesnost měření pro měření proudu jako 0,05 % z naměřené hodnoty + offset 10 mA. Celková standardní nejistota se určí jako vektorový součet nejistot obou typů a rozšíří se dle požadované pravděpodobnosti výskytu správné hodnoty ve vypočteném intervalu.

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (33)$$

$$u_b = \frac{0,05\% \cdot \bar{x} + 0,01}{\Theta} \quad (34)$$

$$e = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (35)$$

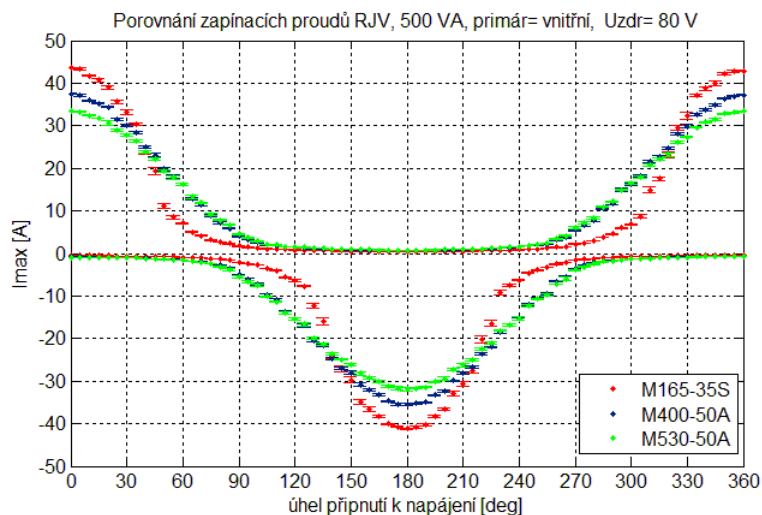
$$E = k_u \cdot u \quad (36)$$



Obrázek 39: Mapa zapínacích proudů s chybovými úsečkami v závislosti na fázi připojení k napájení pro primární napětí 50 až 85 V, plechy M530, vnitřní vinutí vstupní

Největší zapínací proud nastane při připojení k síti ve fázi 180° při maximální záporné remanentní indukci a při připojení k síti ve fázi 0° při kladné maximální remanentní indukci. Z grafu je také vidět, že při dané polaritě remanentní indukce vznikne výrazný zapínací proud jen pro fázi napětí v rozsahu 180° , který je vymezen polaritou remanentní indukce. Nesymetrie mapy je způsobena stejnosměrnou složkou napájecího napětí z použitého zdroje. Stejnosměrná složka způsobuje větší sycení jádra v jednom směru. Velikost zapínacího proudu se tak v případě kladné zbytkové indukce snižuje a v opačném případě zvyšuje

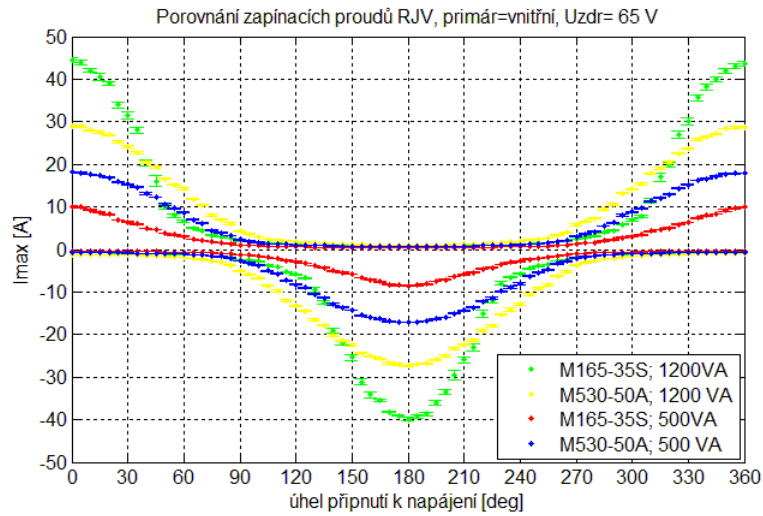
Na obrázku 40 je zobrazeno porovnání naměřených hodnot zapínacích proudů měřeného transformátoru s cívkou 500 VA pro tři materiály jádra transformátoru: M165-35S, M400-50A a M530-50A. V grafu jsou uvedeny zapínací proudy pro primární napětí 80 V a pro vnitřní primární cívku. Nejvyšší zapínací proud měl transformátor s jádrem M165-35S, který má nejnižší ztráty naprázdno, následovaly materiály M400-50A a M530-50A. Maximální hodnoty zapínacích proudů se pohybovali v rozsahu 35 až 45 A. Kompletní mapy zapínacích proudů pro jednotlivé materiály a cívky jsou uvedeny v příloze 9.1. Naměřené zapínací proudy při použití vnitřní cívky jako primární jsou vyšší než při použití cívky sekundární. Návrháři transformátorů však většinou používají vnitřní cívku jako primární. Použité cívky měly také označení primární cívky v tomto smyslu.



Obrázek 40: Porovnání zapínacích proudů měřeného transformátoru RJV pro 3 typy magnetických plechů, pro primární napětí 80, vnitřní vinutí vstupní

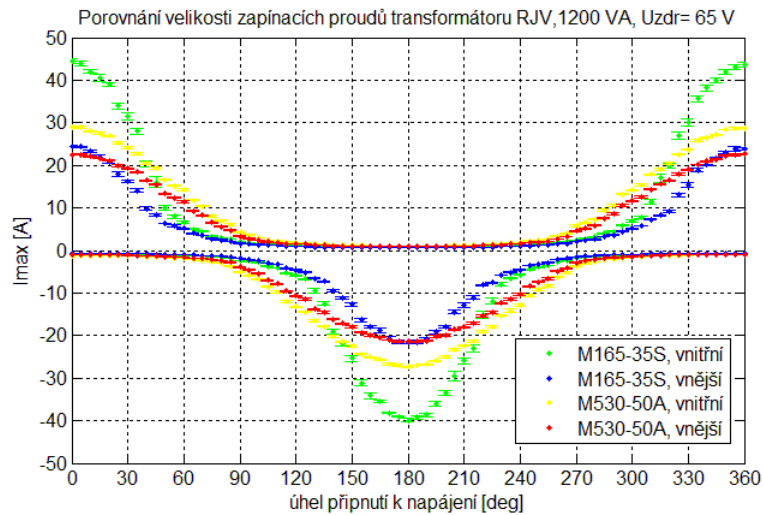
Vliv cívek na velikost maxima zapínacího proudu je patrné z obrázku 41. Při použití cívky 1,2 kVA jsou zapínací proudy vyšší než při použití cívky 500 VA a to v případě použití magnetických plechů M165-35S i M530-50A. To je způsobeno nižším

odporem cívky 1,2 kVA než cívky 500 VA. Naměřené hodnoty odporů a dalších parametrů cívky jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 41: Porovnání zapínacích proudů měřeného transformátoru RJV pro: 2 typy magnetických plechů a 2 cívky, pro primární napětí 65 V, vnitřní vinutí vstupní

Zapínací proudy pro zapojení transformátoru s primární vnější cívku jsou nižší než pro zapojení, kdy je primární cívka vnitřní. Porovnání velikosti maxim zapínacích proudů pro vnitřní a vnější cívku je na obrázku 42. Z toho hlediska je výhodné používat při návrhu transformátorů vnější cívku jako cívku primární.



Obrázek 42: Porovnání zapínacích proudů měřeného transformátoru RJV při zapojení primární cívky jako vnitřní a vnější cívky a 2 typy magnetických plechů, pro primární napětí 65 V, cívka 1200 VA

8. Závěr

Navrhnul jsem měřicí aparaturu pro měření ztrát naprázdno a zapínacího proudu. Vytvořil jsem program pro automatizované měření zapínacího proudu a ztrát naprázdno. Měření jsem prováděl na jednofázovém transformátoru RJV 1,6 o typovém výkonu 1,2 kVA, který vyrábí firma SVED Liberec. Měření jsem provedl pro tři různé magnetické materiály jádra. Jádro transformátoru bylo složeno z plechů: Waasner M165-35S, M400-50A a M530-50A.

Určil jsem ztráty naprázdno transformátorů pro každý materiál pomocí dvou přístupů a to pomocí napětí a proudu naprázdno a v druhém případě pomocí plochy hysterezní křivky. V prvním případě jsem provedl statistické vyhodnocení vypočtených hodnot s určením nejistot měření. Měření ztrát jsem provedl pro frekvenci 50 Hz. Ztráty naprázdno jsem vykreslil v závislosti na pracovní indukci. Tuto formu používají i výrobci magnetických plechů. Pro každý materiál jsem také určil hysterezní smyčku při síťovém napětí a frekvenci. Celkové ztráty naprázdno jsem rozpočítal na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Vypočtené ztráty naprázdno odpovídají hodnotám, které uvádí výrobce.

Dále jsem změřil průběhy zapínacích proudů pro různý časový okamžik připnutí transformátoru k napájení. Maxima těchto proudů jsem vykreslil jako mapy zapínacích proudů v závislosti na úhlu připnutí pro dvě hodnoty remanentní indukce. Měření jsem provedl opakovaně za stejných podmínek a určil jsem velikost rozšířené standardní nejistoty, které jsou zobrazeny spolu s naměřenými daty v mapách zapínacích proudů. Nejvyšší zapínací proud nastává při připnutí transformátoru k napětí ve fázi 180° pro maximální zápornou remanentní indukci resp. ve fázi 0° pro maximální kladnou remanentní indukci. Z důvodu proudového omezení použitého analyzátoru jsou zapínací proudy naměřeny pro nižší hodnoty napájecího napětí, než je síťové. Měření jsem provedl postupně pro dvě cívky: 500 VA a 1200 VA. Na transformátorech s cívkou 500 VA jsem naměřil nižší hodnoty zapínacího proudu v porovnání s cívkou 1200 VA. Změřil jsem velikosti zapínacího proudu pro vnitřní i vnější vinutí použitých cívek. Konstrukteři většinou navrhnou primární cívku jako vnitřní, tak tomu bylo i v případě měřených cívek. Maxima zapínacích proudů byly pro vnější cívku nižší než pro vnitřní. Z tohoto hlediska by bylo vhodné používat pro primární vinutí vnější cívku. Hodnoty z naměřených map zapínacích proudů lze uplatnit při konstrukci transformátoru nebo návrhu zařízení pro jeho omezení.

Měření zapínacích proudů bylo zatíženo chybou metody, kterou způsobovala stejnosměrná složka napětí z použitého programovatelného impedančního analyzátoru. Stejnosemerná složka způsobuje nesymetrii map.

Dalším možným pokračováním této práce by mohlo být měření zapínacích proudů i pro další používané a vyráběné materiály magnetických plechů. Zajímavé by také bylo porovnání zapínacích proudů klasických a toroidních transformátorů. Přínosné by také bylo provést měření při napájení síťovým napětím nebo porovnání naměřených hodnot zapínacích proudů s přibližnými teoretickými výpočty. Vytvořené měřicí programy lze využít i pro budoucí měření zapínacích proudů.

Seznam použité literatury

- [1] NOVÁK, Miroslav. *Přechodový děj při zapnutí transformátoru, způsoby omezování zapínacího proudu*. [disertační práce]. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003, 393 s. ISBN 80-7083-787-X.
- [2] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. Brno: VUTUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [3] 29 Magnetické materiály. *Index of /panska/2A/kazi* [online]. 2008 [vid. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://ozeas.sdb.cz/panska/2A/kazi/29%20%20%20Magnetick%e9%20materi%e1ly.doc>
- [4] MCLYMAN, Colonel William T. *Transformer and inductor design handbook*. 3rd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, 2004, 1 v. ISBN 08-247-5393-3.
- [5] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-860-5649-X.
- [6] JEZIERSKI, Eugenius. *Transformátory: Teoretické základy*. 3. oprav. a dopl.vyd. Praha: Academia, 1973, 650 s. ISBN 509-21-875.
- [7] WOJCIECH, Pluta. Measurement of Some Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets Under Axial Magnetization. *MATERIALS IN ELECTRICAL ENGINEERING* [online]. 2009 [vid. 2013-03-02]. DOI: 978-1-4244-3898-3/09. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5156089>
- [8] DUFEK, Milan. *Magnetická měření*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964, 403 s.
- [9] HAMPL, Josef et al. *Materiály pro elektrotechniku*. Vyd. 2., přeprac. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1996. 165 s. ISBN 80-01-01544-0.
- [10] Materiály používané k výrobě toroidních, dělených a unicore jader pracujících při frekvenci 50 Hz. *ArcelorMittal Technotrom s.r.o.* [online]. 1.11.2008 [vid. 2012-03-13]. Dostupné z: http://www.technotron.cz/AMT_materialy_cz.aspx
- [11] AGILENT TECHNOLOGIES. *User's Guide: AC Power Solutions Agilent Models 6813B*. Malaysia, 2004
- [12] Magnetische und technologische Eigenschaften. WAASNER GMBH. *Downloads - Waasner* [online]. 2011 [vid. 2013-03-02]. Dostupné z: http://www.waasner.de/fileadmin/Assets/PDFs/MagTechnEigenschaften_112011.pdf

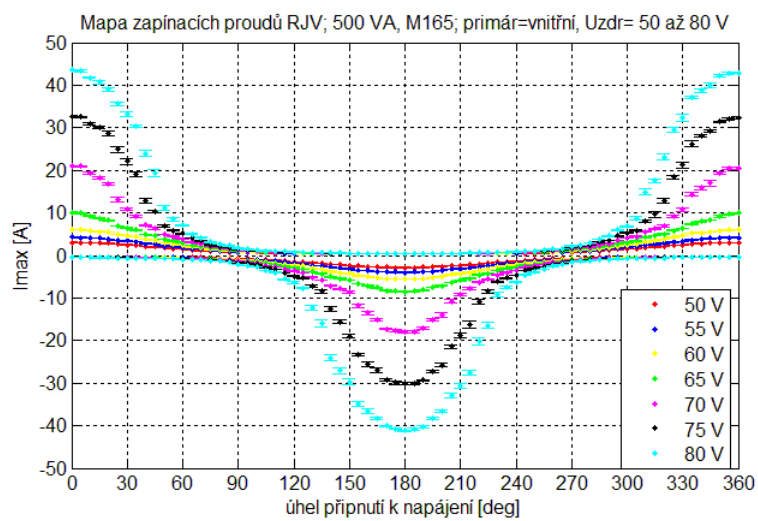
9. Přílohy

9.1 Naměřené mapy zapínacích proudů měřených vzorků

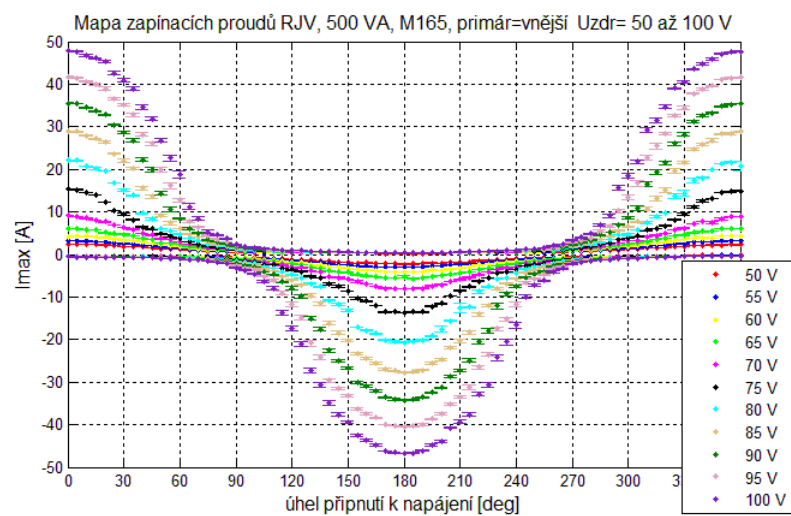
9.1.1 Materiál jádra M165-35S

- cívka 500 VA

primární cívkou je vnitřní cívka

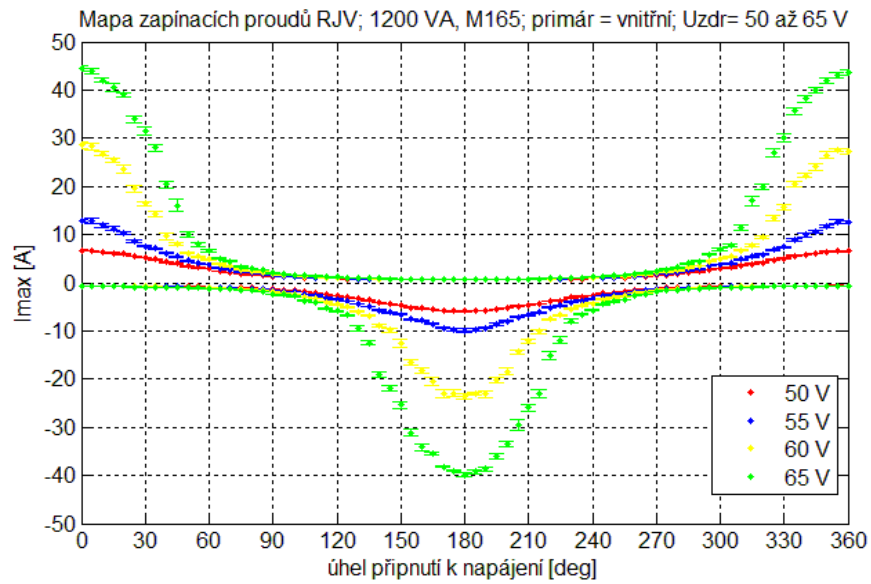


primární cívkou je vnější cívka

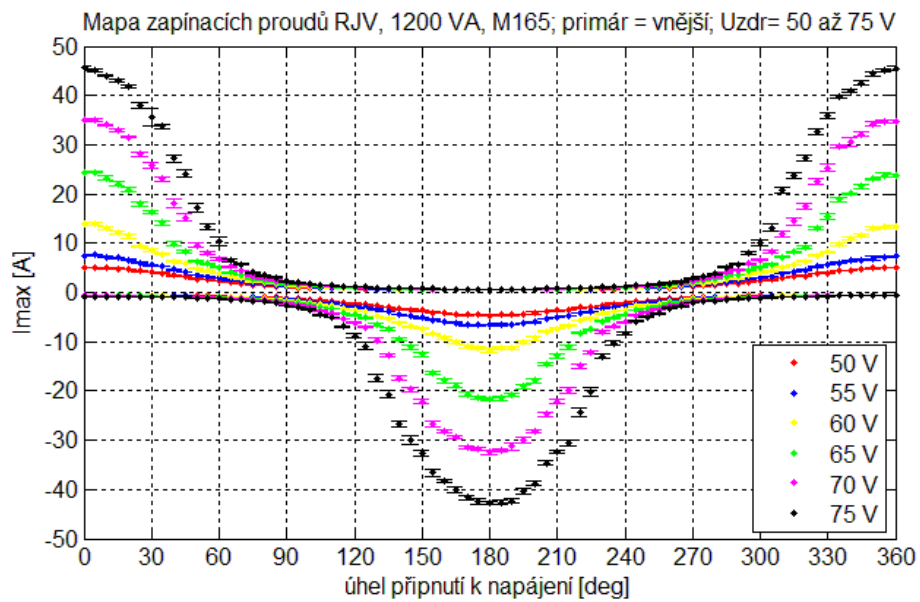


- cívka 1200 VA

primární cívkou je vnitřní cívka



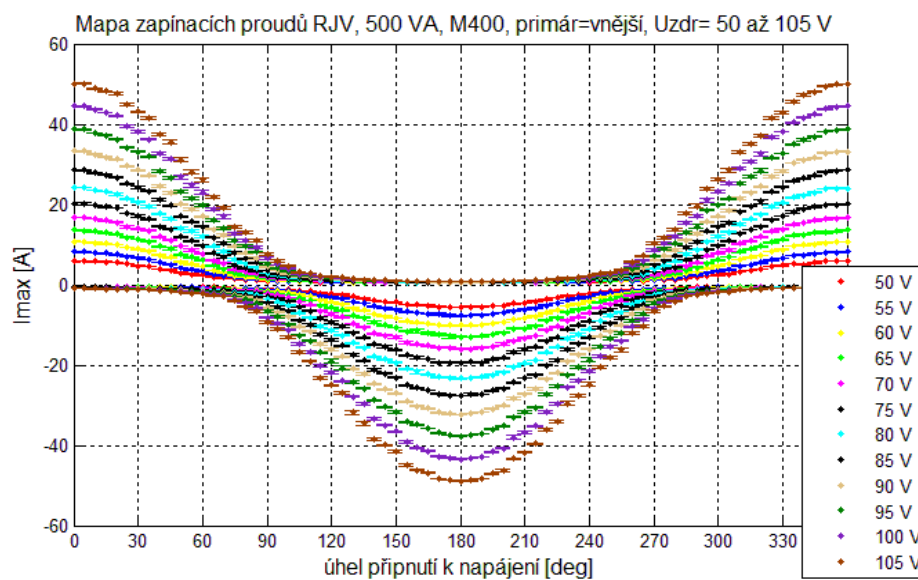
primární cívkou je vnější cívka



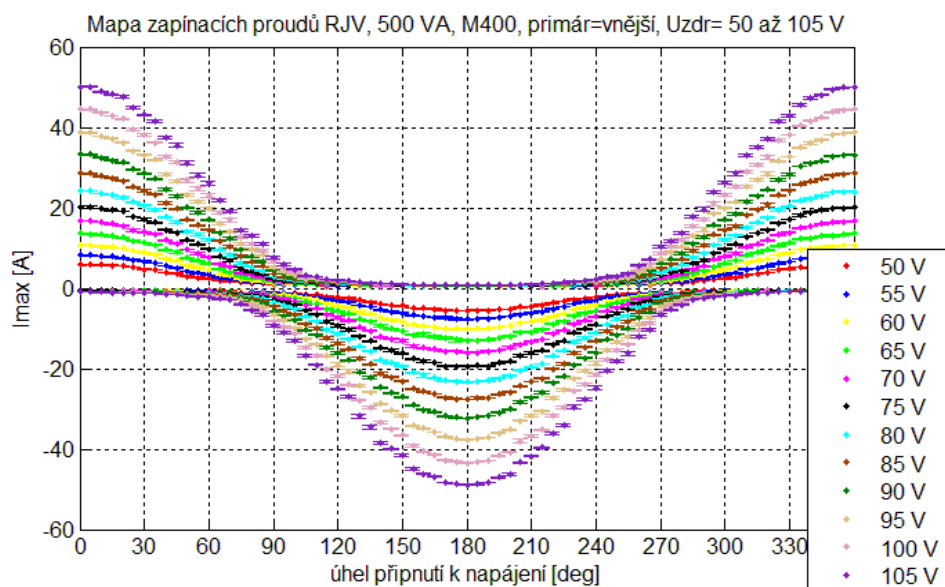
9.1.2 Materiál jádra M400-50A

- cívka 500 VA

primární cívkou je vnitřní cívka

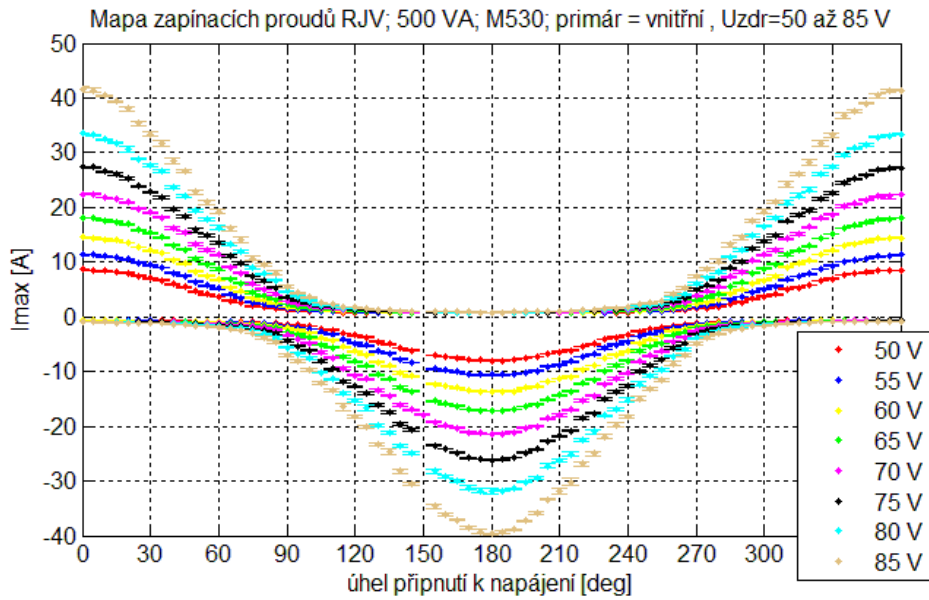


primární cívkou je vnější cívka

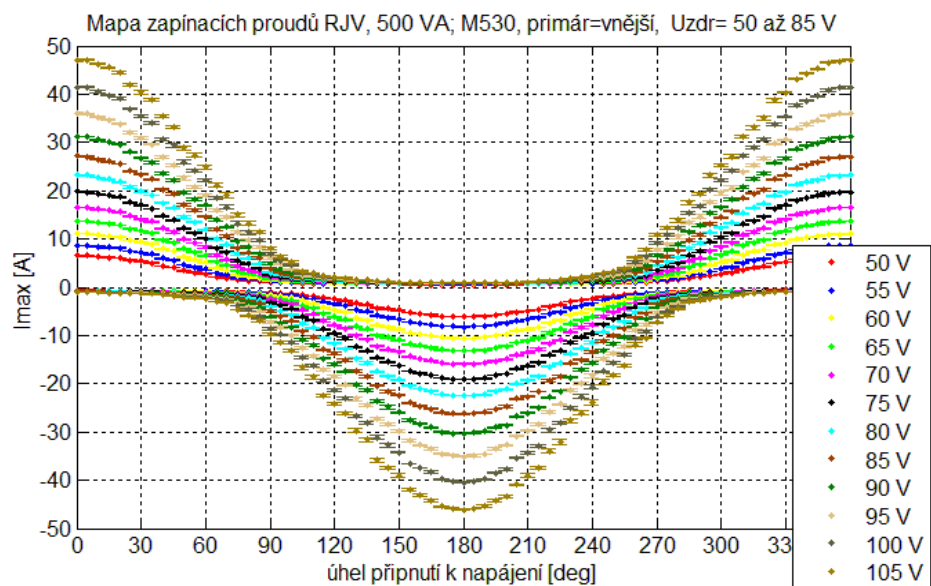


9.1.3 Materiál jádra M530-50A

- cívka 500 VA
primární cívkou je vnitřní cívka

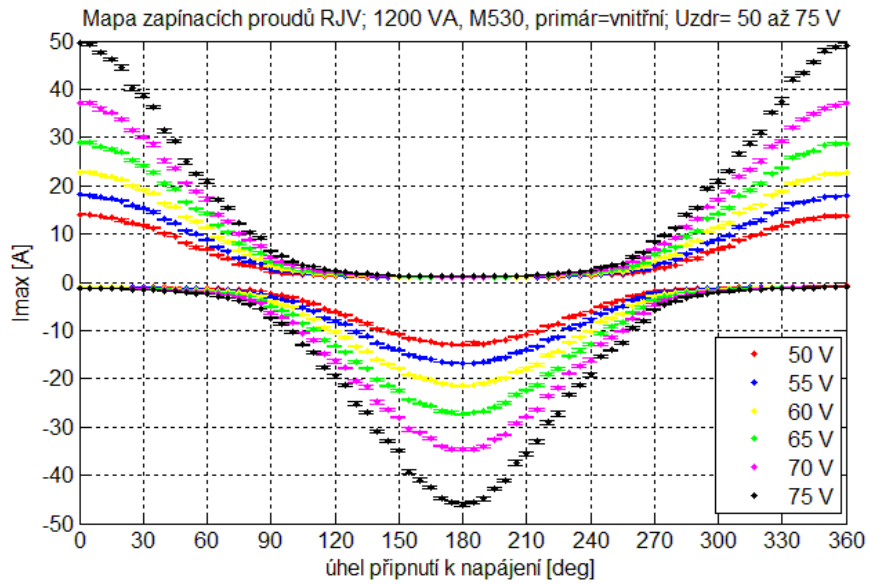


primární cívkou je vnější cívka

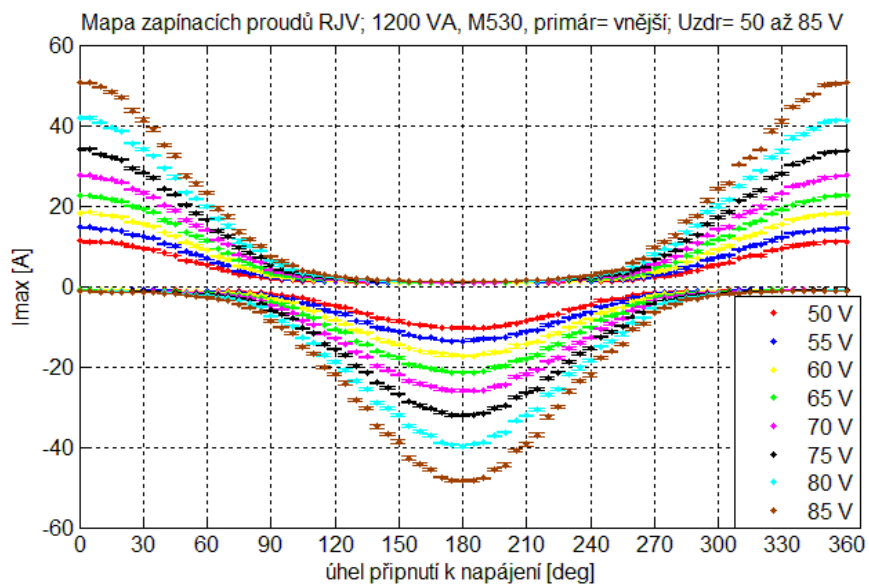


- cívka 1200 VA

primární cívkou je vnitřní cívka

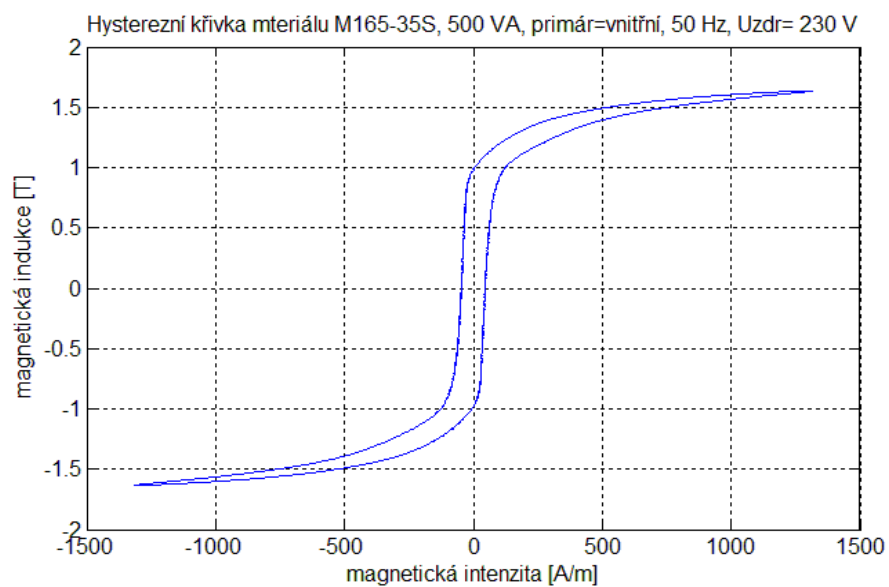


primární cívkou je vnější cívka

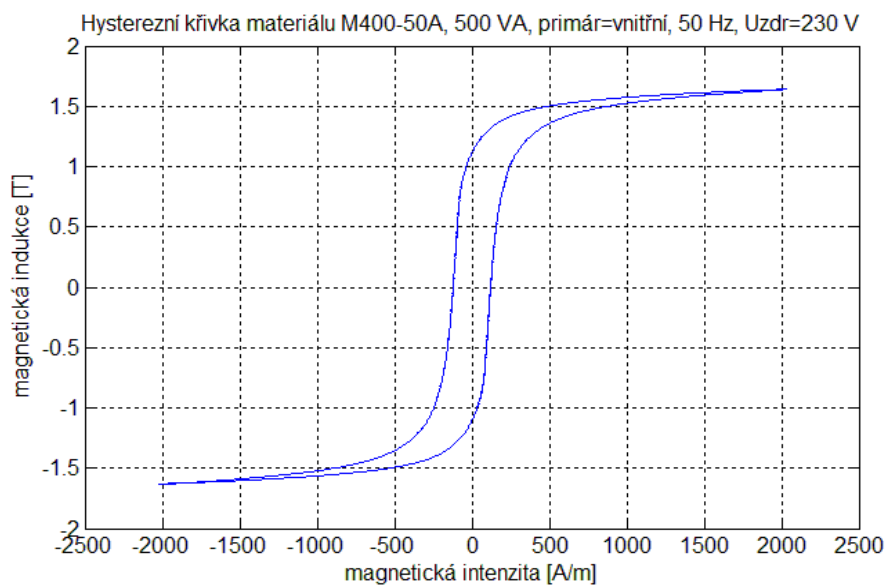


9.2 Hysterezní křivky použitých materiálů jádra

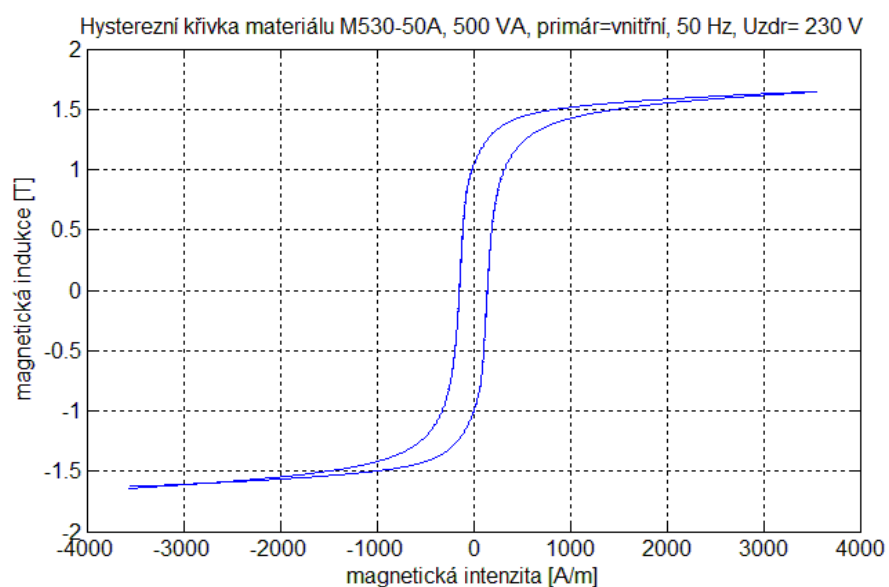
9.2.1 Hysterezní křivka M165-35S



9.2.2 Hysterezní křivka M400-50A

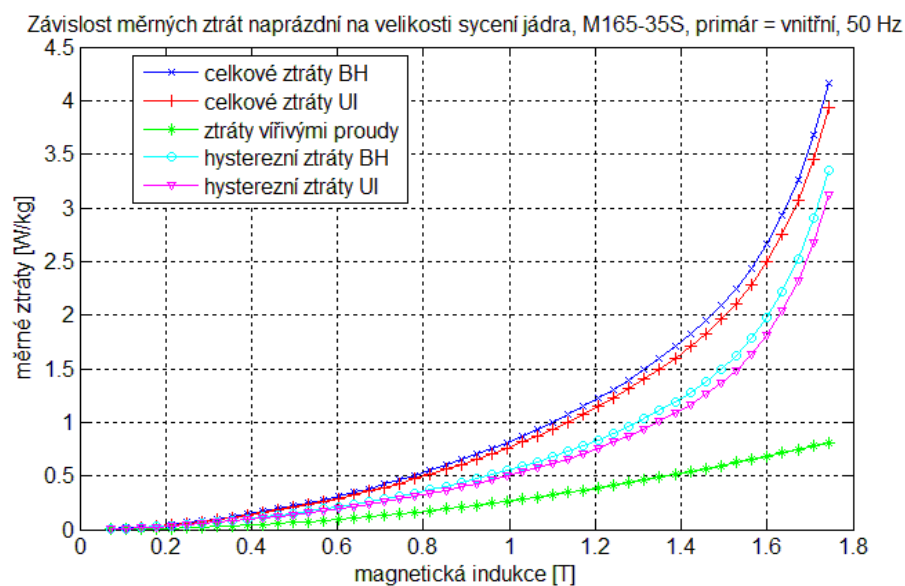


9.2.3 Hysterezní křivka M530-50A



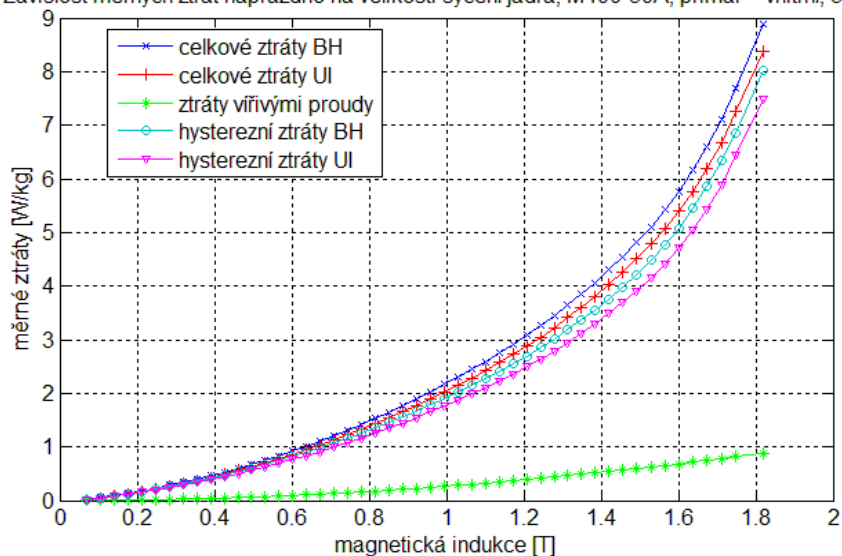
9.3 Ztráty naprázdno použitých materiálů jádra

9.3.1 Ztráty naprázdno pro M165-35S



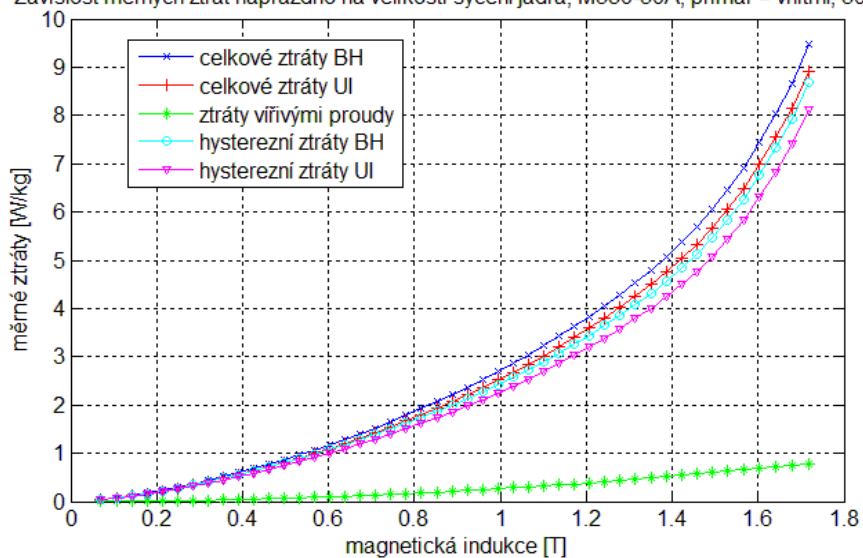
9.3.2 Ztráty naprázdno pro M400-50A

Závislost měrných ztrát naprázdno na velikosti sycení jádra, M400-50A, primár = vnitřní, 50 Hz



9.3.3 Ztráty naprázdno pro M530-50A

Závislost měrných ztrát naprázdno na velikosti sycení jádra, M530-50A, primár = vnitřní, 50 Hz



9.4 Obsah přiloženého DVD

V přiloženém DVD jsou uložena naměřená data z měření zapínacích proudů a z měření ztrát naprázdno. Také jsou zde k dispozici použité programy pro vyhodnocení naměřených dat a fotografie pracovišť.

V následujícím seznamu je adresářová struktura přiloženého DVD (pouze do druhé úrovně vnoření).

„fotografie/měření_parametrů_cívek“

Složka obsahující fotografie měřicího pracoviště pro měření parametrů cívek 500 VA a 1200 VA.

„fotografie/měření_zapínacích_proudů“

Fotografie měřicího pracoviště pro měření zapínacích proudů transformátoru.

„fotografie/měření_ztrát“

Fotografie měřicího pracoviště pro měření ztrát transformátoru naprázdno.

„programy“

Programy pro měření ztrát naprázdno a zapínacích proudů. Dále jsou zde také umístěny programy pro zpracování naměřených dat.

„zapínací_proudy/cívka500VA“

Složka obsahující naměřená data z měření zapínacích proudů pro cívku 500 VA pro materiály jádra transformátoru M165-35S, M400-50A, M530-50A.

„zapínací_proudy/cívka1200VA“

Naměřená data z měření zapínacích proudů pro cívku 1200 VA pro materiály jádra transformátoru M165-35S, M530-50A.

„ztráty/M165_500VA_ztratyNaprazdno“

Naměřená data z měření ztrát naprázdno pro cívku 500 VA pro materiál jádra transformátoru M165-35S.

„ztráty/M400_500VA_ztratyNaprazdno“

Naměřená data z měření ztrát naprázdno pro cívku 500 VA pro materiál jádra transformátoru M400-50A.

„ztráty/M530_500VA_ztratyNaprazdno“

Naměřená data z měření ztrát naprázdno pro cívku 500 VA pro materiál jádra transformátoru M530-50A.