

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zatěžování transformátorů

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Tato bakalářská práce shrnuje základní informace o konstrukci, výrobě a měření jednofázových toroidních transformátorů. Hlavním předmětem práce bylo změření předložených dvou transformátorů naprázdno, nakrátko a porovnat vypočtené parametry náhradního schéma. Stejně vzorky následně zatěžovat v úsporném zapojení a navrhnout odbočku jednoho z traf tak, aby bylo možné je zatěžovat ve stejném zapojení po připojení na síť jmenovitými hodnotami. Ve druhé části praktické stránky práce bylo provedeno měření transformátorů při výrobním procesu a po jejich dokončení. V závěru jsou shrnuty výsledky všech měření a stručné zhodnocení výroby.

Klíčová slova

Transformátor, jádro, vinutí, zatížení, měření naprázdno, měření nakrátko, odpor vinutí, výroba, vyšší harmonické

Abstract

This bachelor thesis summarizes basic information about construction, production and measurement of single-phase toroidal transformers. The main objective of the thesis was to measure two transformers presented in the no-load test, short-circuit test and to compare calculated parameters of the equivalent circuit. Then load the same samples in the economical connection and design the number of wires of one sample so that they can be loaded at the same connection when connected to the network by the nominal values. In the second part of the practical part measurements of transformers during production process and after their completion were made. In conclusion, the results of all measurements and a brief evaluation of the production are summarized.

Key words

Transformer, core, winding, loading, no-load test, short-circuit test, winding resistance, production, higher harmonics

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 2.6.2017

Petr Trojáček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	10
1 TEORIE TRANSFORMÁTORU	11
1.1 DEFINICE TRANSFORMÁTORŮ	11
1.2 KONSTRUKCE A PŘEVODENÍ TRANSFORMÁTORU	11
1.2.1 Magnetický obvod	12
1.2.2 Vinutí.....	12
1.3 FUNKCE TRANSFORMÁTORU	13
1.4 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU.....	14
1.4.1 Výpočet parametrů náhradního schéma	15
1.5 ZPŮSOBY ZATĚŽOVÁNÍ TRANSFORMÁTORŮ	16
1.5.1 Odporová zátěž	17
1.5.2 Induktivní zátěž	17
1.5.3 Kapacitní zátěž.....	17
2 MĚŘENÍ TRANSFORMÁTORŮ – TEORIE/ROZBOR	18
2.1 MĚŘENÍ PŘEVODU	18
2.2 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	18
2.2.1 Postup měření	18
2.3 MĚŘENÍ NAKRÁTKO.....	19
2.3.1 Postup měření	19
2.4 MĚŘENÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH PROUDŮ NAPRÁZDNO.....	20
2.4.1 Postup měření	20
2.5 MĚŘENÍ ZATÍŽENÍ DO TRANSFORMÁTORU.....	20
2.6 POPIS MĚŘENÍ VÝROBNÍHO POSTUPU TRANSFORMÁTORŮ	21
2.7 MĚŘENÍ ODPORŮ VINUTÍ.....	22
3 MĚŘENÍ TRANSFORMÁTORŮ	23
3.1 DMG 800	23
3.2 AUTOTRANSFORMÁTOR.....	23
3.3 ÚDAJE K MĚŘENÉMU TRANSFORMÁTORU	24
3.4 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO, PŘEVODU	25
3.4.1 Magnetizační charakteristiky.....	26
3.5 MĚŘENÍ NAKRÁTKO.....	28
3.6 VÝPOČET PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMA	28
3.6.1 Vzorek č. 2.....	28
3.6.2 Porovnání vypočtených parametrů obou vzorků	30
3.7 VYHODNOCENÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH MAGNETIZAČNÍHO PROUDU	30
3.8 MĚŘENÍ ZATĚŽOVÁNÍ DO TRANSFORMÁTORU.....	31
3.8.1 Návrh vinutí speciálního transformátoru pro jmenovitý proud oběma vzorky při úsporném zapojení	33

3.9 MĚŘENÍ A ANALÝZA FIREMNÍCH VZORKŮ	34
ZÁVĚR	41
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

a, b.....	Šířka a výška magnetického jádra (mm)
B.....	Magnetická indukce (T)
$\cos \varphi$	Účinník (-)
D/d	Vnější/vnitřní průměr (mm)
f	Frekvence (Hz)
H	Magnetická intenzita (A/m)
I_1, I_2'	Proud vstupu a výstupu (A)
I_{fe}	Proud v železe (A)
I_μ	Magnetizační proud (A)
l	sřední délka magnetické siločáry jádra (m)
L_μ	Indukčnost magnetického obvodu (H)
L_σ	Indukčnost vinutí (mH)
p	Převod (-)
R_1	Odpor vstupního vinutí (Ω)
R_2'	Odpor výstupního vinutí přepočteného na primární stranu (Ω)
R_{fe}	Fiktivní odpor magnetického obvodu (Ω)
R_k	Celkový odpor vinutí při stavu nakrátko (Ω)
S_{fe}	Průřez jádra (m ²)
U.....	Napětí (V)
U_i	Indukované napětí (V)
U_k	Efektivní hodnota napětí nakrátko (V)
u_k	Napětí nakrátko v procentech (%)
X_1	Rozptylová indukční reaktance vstupního vinutí (Ω)
X_2'	Rozptylová indukční reaktance výstupního vinutí přepočtená na primár (Ω)
X_k	Celková indukční reaktance vinutí při stavu nakrátko (Ω)
X_μ	Fiktivní indukční reaktance magnetického obvodu (Ω)
X_σ	Rozptylová indukční reaktance vinutí (Ω)
Z_k	Impedance vinutí při stavu nakrátko (Ω)
Φ	Magnetický tok (Wb)
Φ_h	Hlavní magnetický tok (Wb)
Φ_σ	Rozptylový magnetický tok (Wb)

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis, analýzu a návrh jednofázových transformátorů pomocí měření a následných výpočtů. První část, teoretická, se zabývá definicí, konstrukcí, funkcí a možnými způsoby zatěžování transformátorů. Celá teorie je zaměřena na toroidní jednofázové transformátory, na kterých také probíhalo měření. Druhá část je praktická, zahrnující měření, které je rozděleno na dvě části. První část měření se provedla v laboratořích elektrotechnické fakulty FEL, jejíž hlavním cílem bylo zatěžovat dva transformátory v úsporném zapojení a navrhnout odbočku jednoho z transformátorů tak, abychom dosáhli jmenovitých hodnot na obou vzorcích po připojení na síť. Tomu ještě předcházela měření v krajních režimech transformátorů, tedy naprázdno a nakrátko, která poskytla bližší poznání transformátorů. Druhé měření proběhlo ve firmě CZECHMONT, kde se měřilo 20 kusů formou mezioperačních zkoušek od samotného jádra až po konečný výrobek, na kterých se pak provedla měření pro zjištění parametrů náhradního schéma a odporů vinutí. Cílem bylo zanalyzovat kompletní výrobu transformátorů a naleznout případné příčiny možných výkonových dysbalancí.

1 TEORIE TRANSFORMÁTORU

1.1 Definice transformátorů

Transformátory jsou stroje, spadající do kategorie netočivých elektrických strojů. Tyto stroje mají největší využití v oblasti přenosu elektrické energie, kde pracují tzv. zvyšovací a snižovací blokové transformátory, které upravují napětí tak, aby přenos výkonu byl hospodárný s co nejmenšími Joulovými ztrátami. Na transformátory můžeme též narazit v průmyslových zařízeních, radiotechnice, automatizačních a regulačních zařízeních. Široké využití mají i malé transformátory např. v elektronických obvodech. Transformátory obecně slouží k přeměně střídavého napětí, proudu, a tedy i výkonu, za stejného kmitočtu na požadované hodnoty. V současné době nám technika umožňuje spolu s konstruktéry vyrobit transformátory téměř neomezených výkonů. Jmenovitá napětí se pohybují od zlomků voltů až do stovek kilovoltů. Transformátory se liší podle počtu fází, chlazení aktivních částí, uspořádání magnetického obvodu a počtu jader, poměru vstupního a výstupního napětí, způsobu zapojení vinutí a počtu vinutí. Vzhledem k absenci pohyblivých částí nejsou vysoké náklady na údržbu transformátorů. [1,2,3]

1.2 Konstrukce a provedení transformátoru

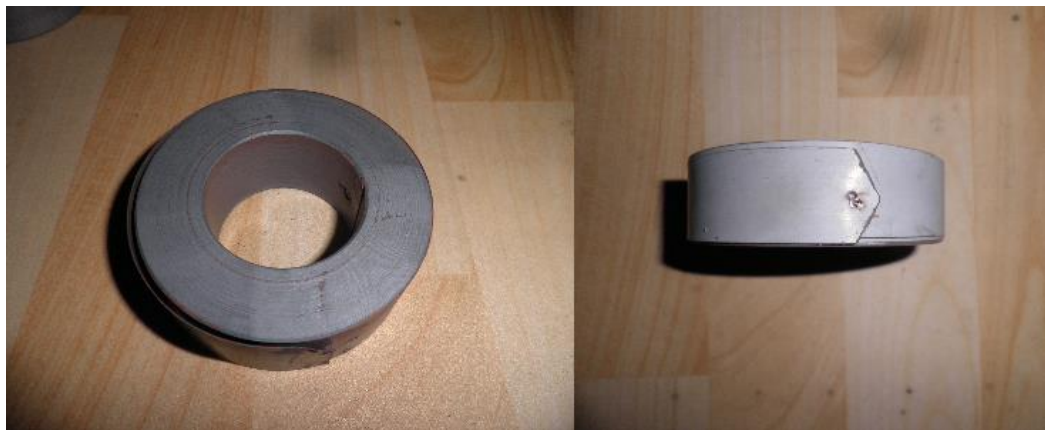
Před samotným popisem funkce a měřením transformátoru je třeba znát, z jakých částí se transformátor skládá, k čemu jsou tyto prvky určeny a jak jsou modifikovány. Transformátory mají vzhledem k ostatním strojům poměrně jednoduchou konstrukci. Jednofázový transformátor se skládá z jádra, představující magnetický obvod a minimálně dvou vinutí, též označovaných jako elektrický obvod. Konstrukce trojfázového transformátoru je s ohledem na větší přenášené výkony rozšířena o mechanické části a chladicí nádobu s příslušenstvím. [1]



Obr. 1.1 Jednofázový transformátor s toroidním jádrem [13]

1.2.1 Magnetický obvod

Podle uspořádání magnetického obvodu rozlišujeme transformátory na dva typy, jádrové a plášťové. Magnetický obvod je zhotoven z elektrotechnické oceli vyválcované za tepla do tenkých pásů, které nazýváme elektrotechnické plechy. Tyto plechy se označují Et, Eo a Ei. Naše transformátorové vzorky byly zhotoveny z plechů Eo (elektrotechnické plechy orientované). Při jejich zpracování se docílí orientace krystalů, a tím i magnetické textury. Plechy jsou oboustranně opatřeny Kerizolem, izolační vrstvou o tloušťce 2 až 5 μm , která slouží k vzájemné izolaci plechů v magnetickém obvodu pro snížení ztrát vířivými proudy. Důraz je kladen při skládání plechů, aby nevznikaly vzduchové mezery, které by způsobovaly větší magnetický odpor. Správným složením můžeme dosáhnout hodnoty magnetické indukce až 1,8T. Volba plechů je dána frekvencí. Křemíkové oceli se používají do stovek Hz. Vysokofrekvenční transformátory jsou opatřeny práškové feromagnetické slitiny. [3,4]



Obr. 1.2 Toroidní jádro TR 100VA 24V

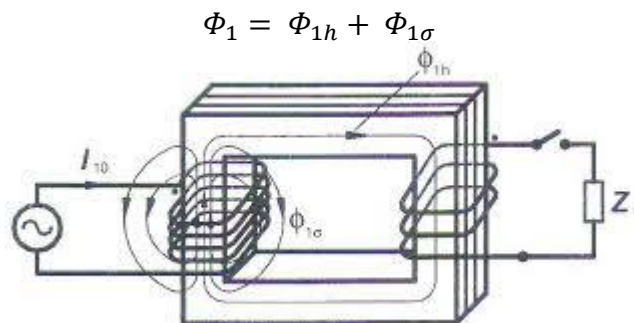
1.2.2 Vinutí

Vinutí je dalším základním prvkem transformátoru. Jeho výroba přihlíží k řadě požadavků jako je mechanická pevnost, elektrická pevnost, technologická proveditelnost, odolnost proti tepelnému namáhání a ekonomika provozu. Při konstrukci se vychází z požadovaného jmenovitého proudu, kterým je pak dán průřez vodiče, hustota proudu ve vodiči, materiál, tvar a oteplení vodiče. Průměr drátů primárních vinutí našich transformátorů je 0,355 mm, průměr sekundárního je 1 mm. Jmenovitým napětím je dána konstrukce izolace mezi závity a uspořádání vodičů. Podle umístění vinutí nižšího a vyššího napětí na jádru rozlišujeme vinutí na sousedá a prostřídaná. Sousedá vinutí se umísťuje tak, že vinutí vyššího napětí se umístí blíže k jádru (přímo na něj) a vinutí nižšího napětí se umístí vně (na vinutí vyššího napětí). [1,2]

1.3 Funkce transformátoru

Základem funkce je elektromagnetická indukce. Po připojení střídavého zdroje napětí na primární vinutí, začne protékat obvodem proud I_{10} , který následně vyvolá magnetický tok Φ_1 stejné frekvence jako má napětí zdroje. Magnetické jádro tvoří uzavřený obvod pro tento tok. Ten se skládá ze dvou složek, hlavního toku Φ_{1h} uzavírajícího se jádrem a určující velikost indukovaných napětí v obou vinutích a rozptylového toku $\Phi_{1\sigma}$, který je kolem vinutí a má malý vliv na velikost přenášené energie, bývá 0,25% celkového magnetického toku Φ_1 . [1,3]

Pro magnetický tok vyvolaný proudem I_{10} platí:



Obr. 1.3 Schéma 1f transformátoru naprázdno [3]

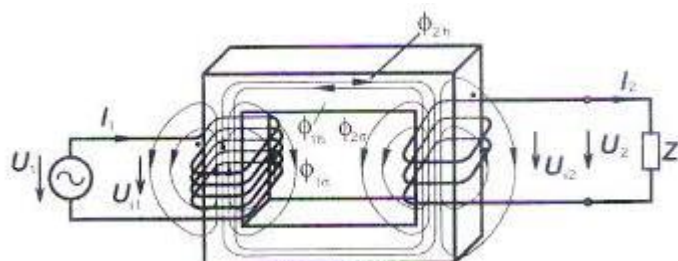
Po připojení zátěže začne působit změna magnetického toku na závity sekundárního vinutí a začne se v něm indukovat napětí U_{12} , které následně protlačí vinutím proud I_2 . Proud I_2 je příčinou vzniku toku Φ_2 , který působí proti toku Φ_1 . Mezi toky vzniká fázový posun, proto se počítají ve fázorovém tvaru. Vysvětlený princip platí pro jednofázový transformátor a též pro jednu fázi třífázového transformátoru. [1, 3]

Pro magnetický tok, vyvolaný proudem I_2 platí:

$$\Phi_2 = \Phi_{2h} + \Phi_{2\sigma}$$

Výsledný magnetický tok:

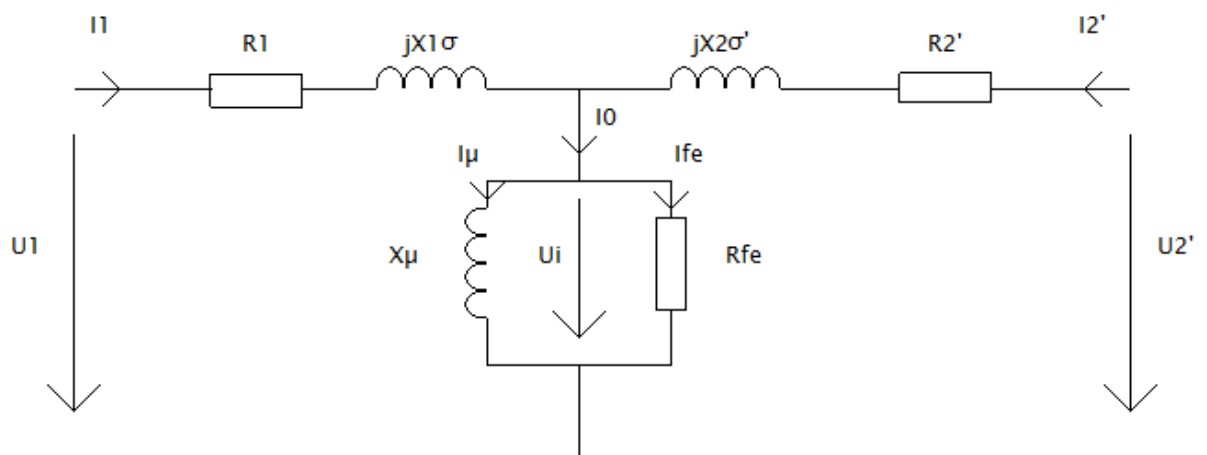
$$\Phi = \Phi_{1h} - \Phi_{2h}$$



Obr. 1.4 Schéma 1f transformátoru při zatížení [3]

1.4 Náhradní schéma transformátoru

Náhradní schéma transformátoru je znázorněno pasivními prvky. Ve schématu se uplatňují harmonické veličiny a také veličiny pro ustálený stav. Slouží k seznámení se s fyzikální podstatou stroje. Lze jej popsat početními rovnicemi. Hodnoty prvků a elektrických veličin ve schématu se zjišťují pomocí měření naprázdno, nakrátko a následným výpočtem. Abychom mohli s náhradním schématem pracovat a používat hodnoty v něm uvedené, je třeba ho uvést do stavu, kdy bude převod roven 1. Schéma je poté specifické pro všechny transformátory. Převodní vztahy nepředstavují žádný problém, viz. výpočet parametrů náhradního schéma. Převedené veličiny se označují horním indexem, čárkou. [1,3]



Obr. 1.5 Náhradní schéma transformátoru

1.4.1 Výpočet parametrů náhradního schéma

Jak již bylo zmíněno, parametry náhradního schéma se určí za pomoci měřících zkoušek naprázdno a nakrátko. Z měření naprázdno dostaneme hodnoty vstupního a výstupního napětí U_{10} , U_{20} , proudu naprázdno I_{10} , výkonu naprázdno ΔP_0 a účinníku $\cos\varphi_0$. Z měření nakrátko zjistíme napětí nakrátko U_{1k} , proud I_{1k} , výkon nakrátko ΔP_k a účinník nakrátko $\cos\varphi_k$. Způsobů pro výpočet parametrů je více, my jsme zvolili následující. [3]

Jako první se provede výpočet pro účinník naprázdno (lze ho též získat přímo z měřícího přístroje DMG800):

$$\cos\varphi = \frac{\Delta P_0}{U_{10} \cdot I_{10}}$$

Z naměřených napětí jsme schopni spočítat převod:

$$p = \frac{U_{10}}{U_{20}}$$

Při známém účinníku a proudu naprázdno se spočítají obě jeho složky, tedy činná a jalová:

$$\begin{aligned} I_{Fe} &= I_0 \cdot \cos\varphi \\ I_{\mu} &= I_0 \cdot \sin\varphi \end{aligned}$$

Nyní můžeme spočítat první dva parametry náhradního schéma v příčné větvi, činný odpor a indukční reaktanci železa:

$$\begin{aligned} R_{Fe} &= \frac{U_{10}}{I_{Fe}} \\ X_{\mu} &= \frac{U_{10}}{I_{\mu}} \end{aligned}$$

Z reaktance můžeme odvodit i indukčnost:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Z naměřených hodnot nakrátko určíme parametry podélné větve, jako první vypočítáme pomocí Ohmova zákona celkovou impedanci, kterou pak rozdělíme na činnou a jalovou složku v poměru funkcí $\cos\varphi$ a $\sin\varphi$:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}$$

$$Z_k = R_k + jX_k = Z_k \cos \varphi_k + jZ_k \sin \varphi_k$$

Podélná větev obsahuje dva odpory a dvě reaktance. Výsledné hodnoty R_k a X_k se rovnají součtům odporů $R_1 + R_2'$ a reaktancí $X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$. Hodnoty R_2' a $X_{2\sigma}'$ jsou přepočtené na primární stranu. Jednotlivé hodnoty určíme podílem $R_k/2$ a $X_k/2$, je to dáno rozměry a proudovou hustotou ve vinutí. Z výsledných reaktancí pak snadno dopočteme indukčnosti $L_{1\sigma}$ a $L_{2\sigma}$:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2}$$

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = \frac{X_k}{2}$$

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$R_2' = R_2 \cdot k^2 \rightarrow R_2 = \frac{R_2'}{k^2}$$

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} \cdot k^2 \rightarrow X_{2\sigma} = \frac{X_{2\sigma}'}{k^2}$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

1.5 Způsoby zatěžování transformátorů

V kapitole 1.4 jsem zmínil, že parametry náhradního schéma jsou zjišťovány měřením naprázdno a nakrátko. Při jejich výpočtech se transformátor obecně uvažuje jako ideální, kdy se zanedbávají ztráty ve vinutí nebo v magnetickém obvodu. V reálném případě, kdy je na sekundární vinutí připojena zátěž, však vznikají v transformátoru ztráty jak v magnetickém obvodu, tak i v obou vinutích. Po připojení zátěže začne protékat sekundárním vinutím proud, jež je určen charakterem zátěže. Jednotlivé způsoby zatěžování jsem popsal v následujících odstavcích. [9]

1.5.1 Odporová zátěž

Rezistor (odpor) je zařízení, které odolává toku elektrické energie. Přitom se část energie rozptýlí ve formě tepla. Mezi takové obyčejné zátěže může patřit třeba žárovka nebo elektrický ohřívač. Při této zátěži jsou napětí i proud ve fázi. Při odporové zátěži nevzniká žádný významný nárazový proud. Když je odporová zátěž napájena, hodnota proudu se okamžitě zvýší na ustálenou hodnotu. [10]

1.5.2 Induktivní zátěž

Příkladem takových zátěží mohou být ventilátory, vysavače, transformátory a v podstatě všechna motorizovaná zařízení. Rozdílem mezi tímto typem zátěže je, že proud zaostává za aplikovaným napětím. Indukční zátěže tedy potřebují určitý čas na vyvinutí svého magnetického pole. Induktivní zatížení přitahuje velké množství proudu, nárazového proudu, při prvním napájení. Tato problematika se řeší hlavně ve spojení s indukčními motory. Po několika cyklech nebo sekundách se proud ustálí na jmenovitém proudu při plném zatížení. Doba potřebná k tomu, aby se proud ustálil, je závislá na frekvenci a indukčnosti zátěže. [10, 11, 12]

1.5.3 Kapacitní zátěž

Kapacitní zátěž zajišťuje kondenzátor. Tato součástka se skládá ze dvou vodivých desek oddělených izolátorem, nazývaným též dielektrikem (vzduch, papír, sklo). Při napájení se tato dielektrika nabíjí a kondenzátor pak může zůstat i nabitý dlouho po odpojení zdroje. Příkladem mohou být televizní obrazovky a komponenty elektronických zařízení. Oproti indukční zátěži v tomto případě proud předbíhá napětí. Obecně je známo, že zákazníci nekupují kapacitní zátěže v masivním množství, tak jako tomu je u odporových a indukčních, proto energetické společnosti musí instalovat kondenzátory, aby udržely v síti rovnováhu výkonu. [11, 12]

2 Měření transformátorů – teorie/rozběr

Následující odstavce poskytnou informace o prováděných měřeních. Měření se skládala z experimentů zahrnující procesy získávání kvalitativních a kvantitativních informací o objektu a soubory měření. Tomu všemu předcházela teorie, která vychází již ze známých znalostí o transformátorech. Měření by měla poskytnout jak očekávané výsledky, tak nové informace. [7]

2.1 Měření převodu

Měření převodu byl počáteční krok všech měření. Jelikož naše vzorky obsahují více odboček, bylo potřeba proměřit zvlášť každou odbočku. Měřilo se za sníženého napětí z důvodu bezpečnosti a nedosažení nasyceného stavu, protože převod je definován pro nenasyčený stav. [5]

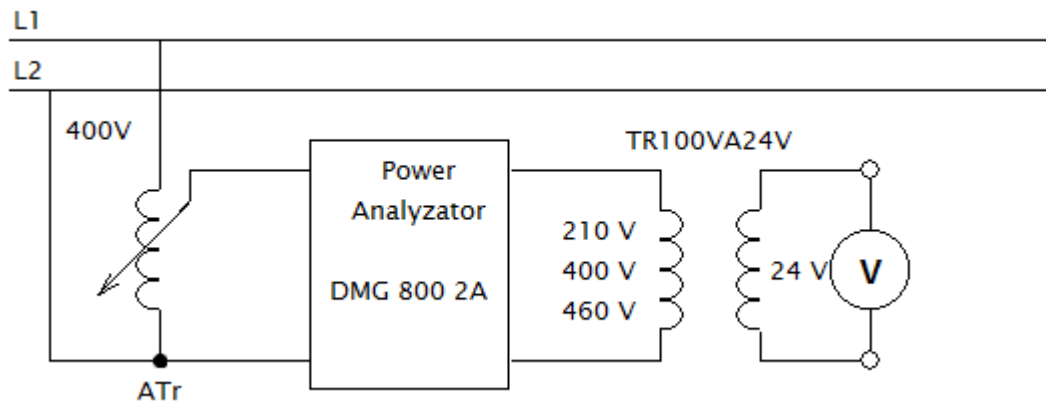
2.2 Měření naprázdno

Stav naprázdno je takový stav, kdy sekundární vinutí je rozpojeno. Cílem měření je určit při jmenovitém napětí proud naprázdno, ztráty v magnetickém obvodu a ve vinutí. Také vytvoření magnetizační charakteristiky je součástí tohoto měření, ze které je možné sledovat sycení železa. Proud naprázdno, protékající napájeným vinutím, je velmi malý, z čehož plyne, že Jouleovy ztráty ve vinutí jsou též malé, nicméně při výpočtech jsem uvážil i tento malý úbytek. Po nasycení jádra je tento úbytek již znatelnější. Z hodnot magnetické indukce B a intenzity magnetického pole H , přepočítaných z naměřených hodnot napětí a proudů, se sestrojí magnetizační charakteristika. Při tomto měření je třeba zjemnit krok změny napětí v oblasti sycení, aby byl správně zachycený „ohyb“ charakteristiky. [5]

2.2.1 Postup měření

Měření naprázdno probíhalo podobně jak v laboratořích FEL ZČU, tak ve firmě CZECHMONT. Transformátor byl zapojen primární stranou vinutí k síti přes ochranný autotransformátor a analyzátor typu DMG 800 s rozsahem 2A. Na sekundární straně byl připojen voltmetr. Měření naprázdno zahrnovalo zjištění proudů, ztrát, účinníků a též napětí na výstupu při napájení jednotlivých odboček. Na analyzátoru se postupně nastavovala regulací jmenovitá napětí odboček po přepojení na příslušnou odbočku a pro ně byly odečtené jednotlivé hodnoty. Následně jsme změřili také magnetizační charakteristiku na odbočce 210 V,

postupnou změnou napětí u vzorku č.1 od 0 V do 283 V. U měření vzorku č.2 jsme již věděli z předchozího měření vzorku č.1., že sycení železného jádra začíná zhruba na 250 V, tudíž jsme měření mohli zkrátit na interval měření od 210 V do 283 V. V laboratořích se měřily jmenovité hodnoty obou vzorků pro všechny odbočky, ve firmě 20 kusů pouze pro jednu odbočku (210V). Měření naprázdno ve firmě bylo provedeno i pro napájení ze sekundární strany pro důkladnější analýzu.



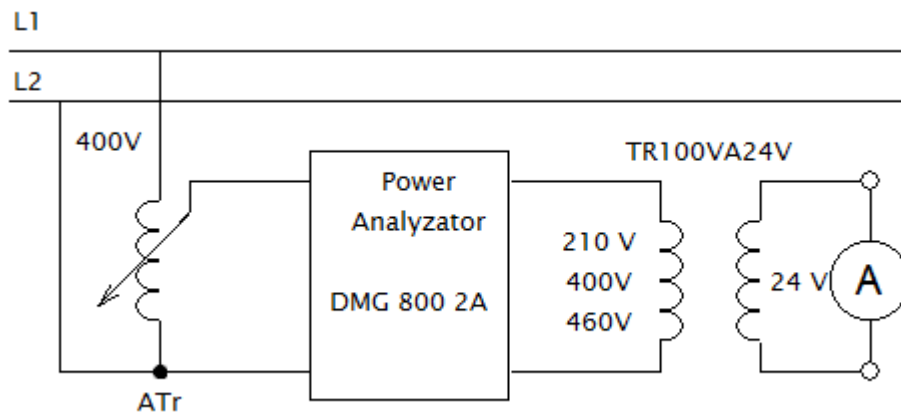
Obr. 2.1 Zapojení pro měření naprázdno

2.3 Měření nakrátko

Při stavu nakrátko, jsou výstupní svorky spojeny bezodporovou spojkou, popř., jako v našem případě, ampérmetrem, který má ideálně nulový vnitřní odpor. Na vstupním vinutí je tzv. napětí nakrátko, pokud oběma vinutími prochází jmenovitý proud. Jeho hodnota se může pohybovat až do 30 % jmenovitého napětí a je to ukazatel tvrdosti zdroje. Transformátor s větším napětím nakrátko má vyšší zkratuvzdornost. Při výpočtech náhradních parametrů se neuvažuje příčná větev náhradního schéma, jelikož procházející proudy primáru a sekundáru jsou v protifázi, což má za následek nenasycení magnetického obvodu. [3,5]

2.3.1 Postup měření

Měření probíhalo obdobně jako u měření naprázdno, v laboratořích i ve firmě. Primární strana se zapojila přes autotransformátor do sítě a na sekundární straně byl zapojen ampérmetr. Pro každou odbočku byl nastaven přibližný jmenovitý proud a pro ní bylo odečteno napětí nakrátko, sekundární proud nakrátko, účinník a ztráty. Ve firmě se měřilo 20 kusů pouze pro jednu odbočku (210V).



Obr. 2.2 Zapojení pro měření nakrátko

2.4 Měření vyšších harmonických proudů naprázdno

Při chodu naprázdno prochází transformátorem proud naprázdno, jehož velikost dosahuje až 10% jmenovitého proudu. Jalová složka proudu naprázdno, tedy magnetizační složka proudu, způsobuje magnetizaci magnetického obvodu, a to je provázáno řadou jevů, které mají vliv na práci transformátoru. Jedním z těchto jevů je určitě přítomnost vyšších harmonických magnetizačního proudu, jejichž měření jsme též zahrnuli do analýzy transformátoru. Časový průběh proudu bude mít neharmonický průběh, což můžeme odvodit z magnetizační charakteristiky, která je nelineární. Je to dáno materiálem plechů a uspořádáním magnetického obvodu. [2,6]

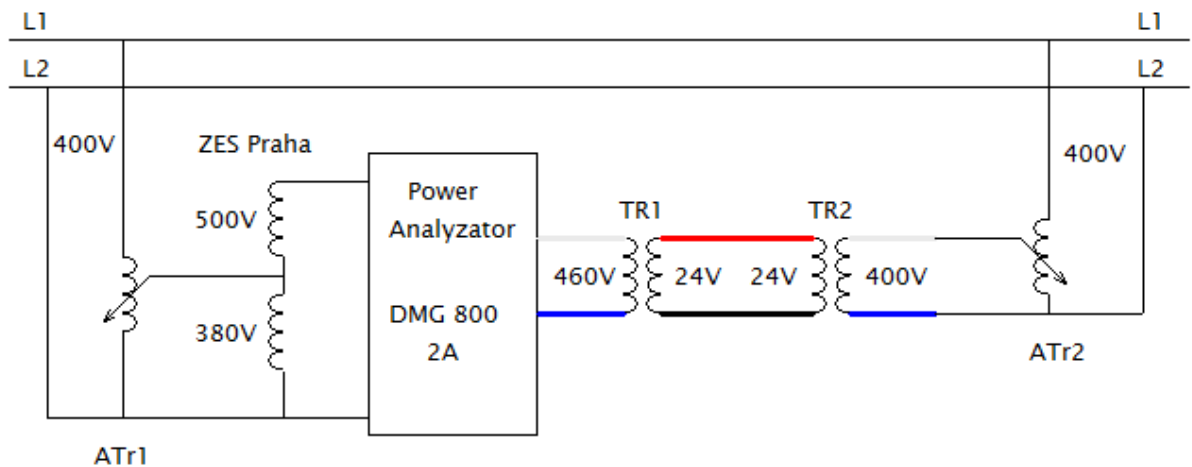
2.4.1 Postup měření

Provedli jsme oscilografii proudu naprázdno za pomoci proudové sondy, k níž byl připojený osciloskop. Z osciloskopu jsme získané průběhy uložili rovnou do počítače. Měření jsme provedli pro různá napájecí napětí na odbočce 210V. Při nasycení se objevuje třetí harmonická, která se projevuje nejvíce. Pro její zachycení jsme měřili i za většího napětí, než jmenovité (210V). Získané průběhy jsme následně v Matlabu pomocí rychlé Furierovi transformace převedli do kmitočtové oblasti. V kapitole 3 je zobrazený převod průběhu pro 200V, ostatní průběhy jsou k dispozici v příloze. [7]

2.5 Měření zatížení do transformátoru

Toto měření se provedlo na základě zadání (bod 3). Zahrnovalo zatěžování dvou transformátorů v úsporném zapojení. Dva vzorky transformátorů jsme zapojili tak, aby primární strany vinutí byly připojeny na síť a sekundární strany byly připojeny do sebe (Obr. 2.3).

V podstatě šlo o rekuperační chod, kdy jsme napájeli TR1 a přes TR2 jsme energii, sníženou o ztráty v transformátorech, vraceli zpět do sítě. Měření jsme prováděli pro jmenovité hodnoty na primární straně TR1 pro 210V, 460V a dodatečně pro 230V, abychom zjistili, jak se bude chovat transformátor při napájení ze sítě. Cílem bylo zjistit napětí a proudy na vstupech a výstupech traf, ze kterých jsme následně mohli provést návrh vinutí TR2 tak, abychom vyrovnali úbytky napětí po připojení na síť. K měření jednotlivých veličin jsme použili multimetry a výkonový měřič DMG800, jehož popis je uveden dále. Při měření jsme v obvodu nechali konstantně zapojené autotransformátory. Do obvodu jsme také navíc použili zvyšovací autotransformátor, který byl potřeba k dosažení jmenovitého napětí 460V při napájení ze sítě (400V). Každé měření jsme provedli dvakrát s odlišným připojením DMG800, jednou před TR1 a podruhé za TR2. Pomocí multimetrů jsme dostávali přímé efektivní hodnoty. Hodnoty proudů naměřených měřičem DMG800 jsme museli násobit převodem $k_i=2/5$.



Obr. 2.3 Zapojení pro zatížení transformátorů do sebe při napájení 460 V

2.6 Popis měření výrobního postupu transformátorů

Za účelem analýzy výroby transformátorů a zjištění případných výkonových dysbalancí, bylo zapotřebí detailně proměřit výrobní postup vybraných 20 kusů transformátorů od samotného jádra až po konečný výrobek. Měření zahrnovala vážení, měření výšky, vnějšího i vnitřního průměru při každém přidání další vrstvy (vinutí, izolace) pomocí posuvného měřítka. Měření bylo započato zvážením a změřením samotných jader, zkonstruovaných z elektrotechnických orientovaných plechů s šípovým typem stříhu. Případné abnormality jader budou k dispozici na fotkách v prezentaci. Po ovinutí izolační páskou se postupně začaly navíjet jednotlivé vrstvy primárního vinutí, které se mezi sebou oddělovaly též izolační páskou. Po zhotovení primárního vinutí byly vyvedeny všechny čtyři vývody. Navinutím sekundárního

vinutí byly transformátory prakticky připravené k započítí měřících zkoušek. Je třeba zmínit, že v naměřených hodnotách rozměrů se mohou vyskytovat chyby vlivem nesouměrně navinutého vinutí, či izolace, které jsou zapříčiněny převážně lidským faktorem. Tabulka všech naměřených údajů je v příloze.

2.7 Měření odporů vinutí

Měření odporů vinutí bylo provedeno pouze na dvaceti vybraných vzorcích ve firmě. Pro měření byla použita Ohmova metoda. Získali jsme tak hodnoty proudu a napětí, ze kterých jsem mohl následně jednoduše, pomocí Ohmova zákona, dopočítat odpor. Pomocí stejnosměrného zdroje (baterie) jsme napájeli jednotlivé odbočky primární i sekundární strany všech kusů transformátorů a odečítali hodnoty napětí a proudů z měřících přístrojů. V měřícím obvodu byl zapojen reostat a ampérmetr, na kterém se pomocí reostatu nastavila snížená hodnota jmenovitého proudu pro eliminování možnosti zvýšení teploty vinutí, což by mohlo mít za následek i změnu odporu. Veškeré naměřené údaje jsou k dispozici v příloze. [5]

3 Měření transformátorů

Tato kapitola poskytne informace o použitých zařízeních, na kterých probíhalo měření. Dále pak naměřené a vypočítané hodnoty, spolu s grafy, ze kterých jsou pak vyvozené výsledky. Pozn. V tabulkách mezi naměřenými hodnotami se vyskytují políčka s označením „X“, to značí nezměření dané hodnoty vlivem přístroje (např. veličina byla příliš malá) nebo promeškání změřit danou hodnotu. Ve firmě bylo totiž třeba se přizpůsobit rychlosti výroby, což se týká jen zlomku změřených veličin (převážně postradatelných) a v neposlední řadě úmyslné vynechání z důvodu postradatelnosti dané veličiny.

3.1 DMG 800

Pro všechna měření naprázdno, nakrátko i pro zatížení transformátorů byl jako měřicí přístroj použit panelový měřič výkonu DMG 800, jež zobrazuje naměřené hodnoty na LCD displeji s přesností $\pm 0,2\%$. Pomocí tohoto analyzátoru jsme odečítali efektivní hodnoty proudů, napětí a výkonu. Přístroj se používá pro 3f síť. Má rozsah od 10V do 480V pro napětí, pro proud od 0,01A do 6A. DMG 800 je možné též využít na analýzu harmonických FFT do 31. harmonické. Hodnoty proudu jsme při měřeních v laboratořích školy násobili proudovou konstantou $k_i=0,4$ a ve firmě CZECHMONT konstantou $k_i=0,5$. [8]

3.2 Autotransformátor

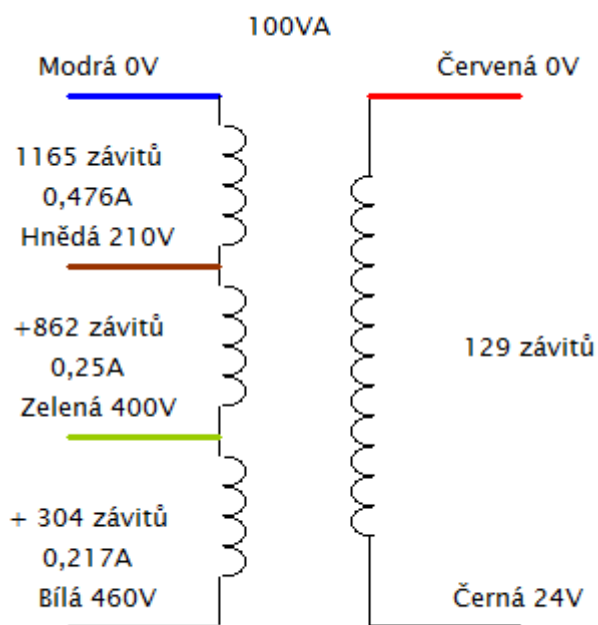
Během měření transformátorů bylo zapotřebí získat na vstup vzorků 460 V, přičemž síť nám nabízela pouze 400V sdružených. Toho jsme dosáhli za pomoci zvyšovacího autotransformátoru, který nám nabídl až 500V. Autotransformátor se skládá ze společné cívky pro primární i sekundární napětí. Výkon autotransformátoru je možno převádět induktivní vazbou, jako u klasického transformátoru, ale též galvanicky. Tím dosahujeme zmenšení rozměrů autotransformátoru. Autotransformátory byly konstantně zapojené v obvodu pro měření zatížení na vstupní a výstupní straně obvodu. [1]

3.3 Údaje k měřenému transformátoru

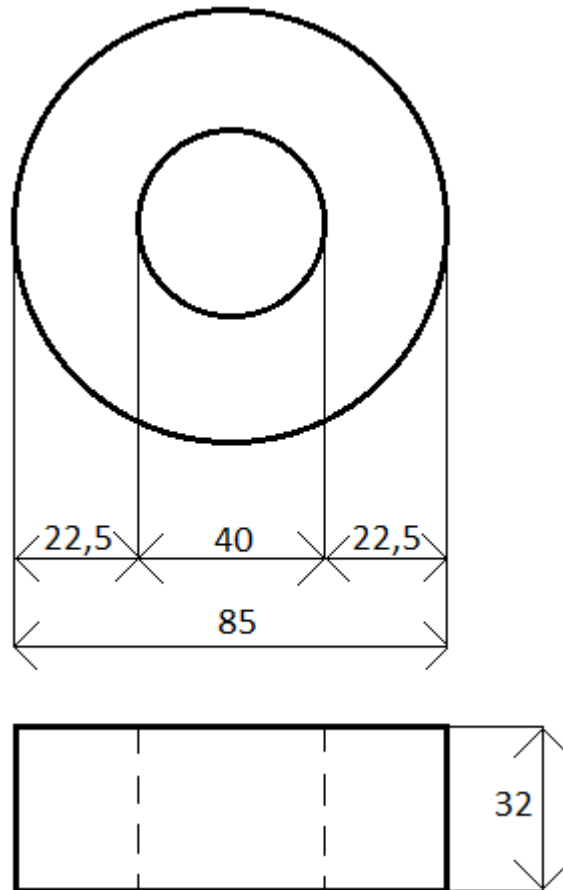
Měření v laboratořích školy, které obsahovalo měření převodu, naprázdno, nakrátko a primárně měření zatížení do transformátoru, probíhalo na dvou totožných hotových vzorcích firmy CZECHMONT. Informace k daným vzorkům (které mají totožný štítek) jsou shrnuty v tabulce (Tab. 3.1), specifické schéma transformátoru a rozměry samotného železného jádra jsou na následujících dvou obrázcích.

Štítek transformátoru			
výrobce	CZECHMONT s.r.o.	f_n	50 Hz
typ	100VA24V	rok výroby	2015
jádro	Toroid		
jmenovitý výkon	100 VA		
	1.	210 V, 1165z	
jmenovitá napětí a počet závitů	2.	400 V, 2027z	24 V, 129z
	3.	460 V, 2331z	
	1.	0,476 A	
jmenovité proudy	2.	0,25 A	4,16 A
	3.	0,217 A	
váha	1200 g	průměr drátů prim a sek vinutí	0,355 a 1 mm

Tab. 3.1 Informace k měřeným vzorkům



Obr. 3.1 Schéma transformátoru 100VA24V



Obr 3.2 Rozměry jádra transformátoru 100VA24V

3.4 Měření naprázdno, převodu

Měření naprázdno + převod					
vzorek č.1					
U1/U1N [V]	I [A]	P [W]	cosφ [-]	U2 [V]	p [-]
210,4/210	0,0036	0,64	0,92	23,4	8,99
399,7/400	X	X	X	25,4	15,74
460,7/460	X	X	X	25,5	18,07
vzorek č.2					
U1/U1N [V]	I [A]	P [W]	cosφ [-]	U2 [V]	p [-]
210,3/210	0,0046	0,76	0,74	26	8,09
399,7/400	0,0048	1	0,63	25,6	15,61
460/460	X	X	X	25,6	17,97

Tab. 3.2 Měření naprázdno a převodu

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{210,4}{23,4} = \frac{1165}{129} \cong 8,99 [-]$$

3.4.1 Magnetizační charakteristiky

Pro zkonstruování magnetizačních charakteristik bylo třeba přepočítat naměřené hodnoty napětí a proudů na magnetickou indukci B a intenzitu magnetického pole H . K tomu bylo třeba zjistit průřez jádra S_{Fe} a střední délku siločáry jádra l . Vycházel jsem z převzatých rozměrů od výrobce CZECHMONT (Obr. 3.2):

$$S_{Fe} = a \cdot b = 22,5 \cdot 32 = 720 [mm^2] = 7,2 \cdot 10^{-4} [m^2]$$

$$l = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 31,76 = 196,34 [mm] = 0,196 [m]$$

Pro ilustraci výsledných hodnot jsem použil tabulku pro vzorek č.2 (Tab. 3.3), vzorek č.1 je v příloze Pro zjištění hledaných veličin jsem vycházel ze vzorců pro výpočet indukovaného napětí a magnetické intenzity. Příklady výpočtů jsou provedené pro jmenovité hodnoty napětí a proudů naprázdno. Skutečné indukované napětí je sníženo o úbytek napětí ve vinutí a i přesto, že je velmi malé, bylo třeba to též zohlednit, proto jsme předběžně zjistili průměrnou hodnotu odporu vinutí odbočky 210 V od výrobce, tedy $R_{210} = 22\Omega$. Vynásobením daného odporu procházejícím magnetizačním proudem jsme zjistili úbytek napětí ve vinutí a tu hodnoty pak odečetli od naměřené hodnoty:

$$U_i = 4,44 \cdot N \cdot B \cdot S_{Fe} \cdot f \rightarrow B = \frac{U_i}{4,44 \cdot N \cdot S_{Fe} \cdot f} =$$

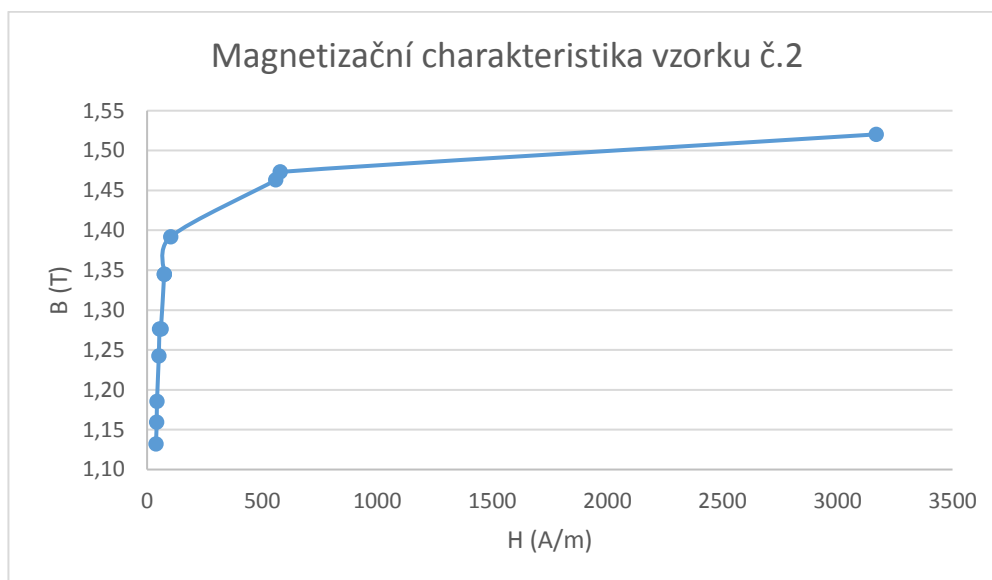
$$= \frac{210}{4,44 \cdot 1165 \cdot 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 50} = 1,127 [T]$$

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \cdot \sqrt{2} = \frac{1165 \cdot 0,0046}{0,1963} \cdot \sqrt{2} = 38,6 [A/m]$$

$$U_i = U - R_{210} \cdot I_0 = 210,2 - 22 \cdot 0,0036 = 210,1 [V]$$

U ₀ [V]	I ₀ [A]	U ₀ s R [V]	B [T]	H [A/m]
210,8	0,005	210,70	1,13	38,26
215,9	0,005	215,79	1,16	41,96
220,7	0,005	220,61	1,19	42,96
231,3	0,006	231,21	1,24	51,02
237,6	0,006	237,49	1,28	54,04
237,7	0,007	237,51	1,28	60,08
250,4	0,009	250,24	1,34	74,18
250,4	0,009	250,24	1,34	74,52
259,2	0,012	258,92	1,39	102,37
272,5	0,067	271,01	1,46	559,20
274,3	0,069	272,81	1,47	578,00
283,1	0,378	274,79	1,52	3167,90

Tab. 3.3 Magnetizační charakteristika vzorek č.2



Obr. 3.3 Magnetizační charakteristika vzorku č.2

3.5 Měření nakrátko

Měření nakrátko					
vzorek č.1					
U/U _{1N} [V]	I ₁ [A]	P [W]	cosφ[-]	I ₂ [A]	uk [%]
35,8/210	0,55	19,92	1	4,9	14,81
53,6/400	0,32	17,24	1	4,9	10,60
61,3/460	0,28	17,28	1	4,9	10,33
vzorek č.2					
U/U _{1N} [V]	I ₁ [A]	P [W]	cosφ[-]	I ₂ [A]	uk [%]
40,4/210	0,55	22,88	1	4,9	16,71
61/400	0,32	19,68	1	4,95	12,06
66,4/460	0,28	18,24	1	4,9	11,35

Tab. 3.5 Měření nakrátko

$$u_k = \frac{U}{U_{1N}} \cdot I_{1N} \cdot 100\% = \frac{35,8}{210} \cdot 0,476 \cdot 100\% = 14,81 \text{ [%]}$$

3.6 Výpočet parametrů náhradního schéma

Parametry náhradního schéma byly stanoveny jak pro vzorky měřené ve škole, tak pro všech dvacet vzorků měřených ve firmě CZECHMONT. Názorný výpočet jsem poskytl pouze u školního vzorku č. 2, u vzorku č. 1 budou uvedeny pouze výsledky. Výpočty parametrů pro firemní vzorky jsou uvedeny v tabulce, která se nachází v příloze.

3.6.1 Vzorek č. 2

Výpočty se odvozují z naměřených hodnot naprázdno a nakrátko pro vzorek č. 2 (Obr. 3.2 a 3.3). Výpočet jsem zahájil zjištěním převodu a určením proudu naprázdno v procentech:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{210,3}{26} = 8,09 \text{ [-]}$$

$$i_{0\%} = \frac{I_0}{I_N} \cdot 100 = \frac{0,0046}{0,4762} \cdot 100 = 0,966 \text{ [%]}$$

Přes výpočet činné a jalové složky proudu naprázdno jsem určil parametry příčné větve náhradního schéma, a tedy fiktivní odpor železa R_{Fe} a fiktivní indukční reaktanci X_μ :

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos\varphi = 0,0046 \cdot 0,74 = 3,404 \text{ [mA]}$$

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin\varphi = I_0 \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi} = 0,0046 \cdot \sqrt{1 - 0,74^2} = 3,094 \text{ [mA]}$$

$$R_{Fe} = \frac{U_1}{I_{Fe}} = \frac{210,3}{3,404 \cdot 10^{-3}} = 61780,25 [\Omega]$$

$$X_{\mu} = \frac{U_1}{I_{\mu}} = \frac{210,3}{3,094 \cdot 10^{-3}} = 67873,45 [\Omega]$$

Dále jsem dopočítal indukčnost:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{68234,91}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 217,20 [H]$$

Po známých parametrech příčné větve, jsem mohl přejít k určení parametrů podélné větve. Začal jsem výpočtem celkové impedance, ze které jsem určil celkový odpor a reaktanci:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{40,4}{0,55} = 73,45 [\Omega]$$

$$\begin{aligned} Z_k = R_k + jX_k &= Z_k \cdot \cos\varphi + jZ_k \cdot \sin\varphi = 73,45 \cdot 0,99 + j73,45 \cdot 0,14 = \\ &= 72,72 + j10,28 [\Omega] \end{aligned}$$

Celkový odpor a reaktanci jsem vydělil dvěma a získal tak jednotlivé hodnoty pasivních prvků včetně indukčností:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = \frac{72,72}{2} = 36,36 [\Omega]$$

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = \frac{X_k}{2} = 5,14 [\Omega]$$

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{5,14}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,016 [H]$$

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2} = \frac{36,36}{8,09^2} = 0,55 [\Omega]$$

$$X_{2\sigma} = \frac{X_{2\sigma}'}{k^2} = \frac{5,14}{8,09^2} = 0,078 [\Omega]$$

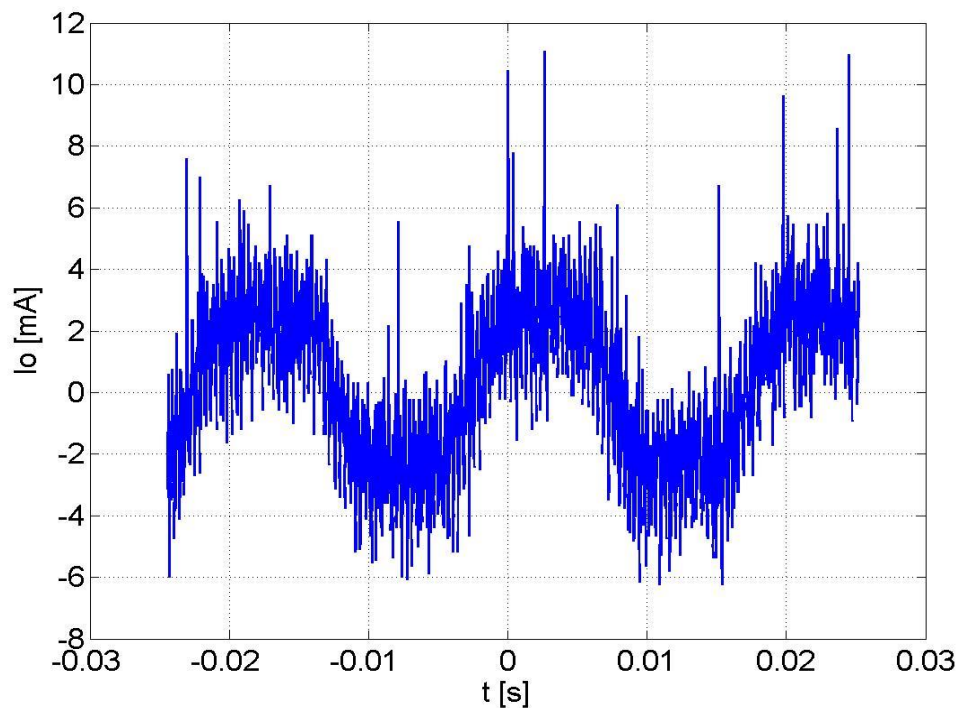
$$L_{2\sigma} = \frac{X_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,078}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,25 [mH]$$

3.6.2 Porovnání vypočtených parametrů obou vzorků

	vzorek č.1	vzorek č.2	Poměrný rozdíl
ρ [-]	8,99	8,09	11,12%
I_0 [%]	0,756	0,966	27,77%
$\cos\varphi$ [-]	0,92	0,74	24,32%
I_{fe} [mA]	3,312	3,404	2,77%
I_μ [mA]	1,411	3,093	119,20%
R_{fe} [Ω]	63526,57	61780,25	2,83%
X_μ [Ω]	149124,23	67873,45	119,71%
L_μ [Ω]	474,67	217,2	118,54%
Z_k [Ω]	65,09	73,45	12,84%
R_k [Ω]	64,44	72,72	11,12%
X_k [Ω]	9,18	10,28	11,98%
$R_1=R_2'$ [Ω]	32,22	36,36	12,84%
$X_{1\sigma}=X_{2\sigma}'$ [Ω]	4,59	5,14	11,98%
$L_{1\sigma}$ [H]	0,015	0,016	6,66%
R_2 [Ω]	0,4	0,55	37,50%
$X_{2\sigma}$ [Ω]	0,057	0,078	36,84%
$L_{2\sigma}$ [mH]	0,18	0,25	38,88%

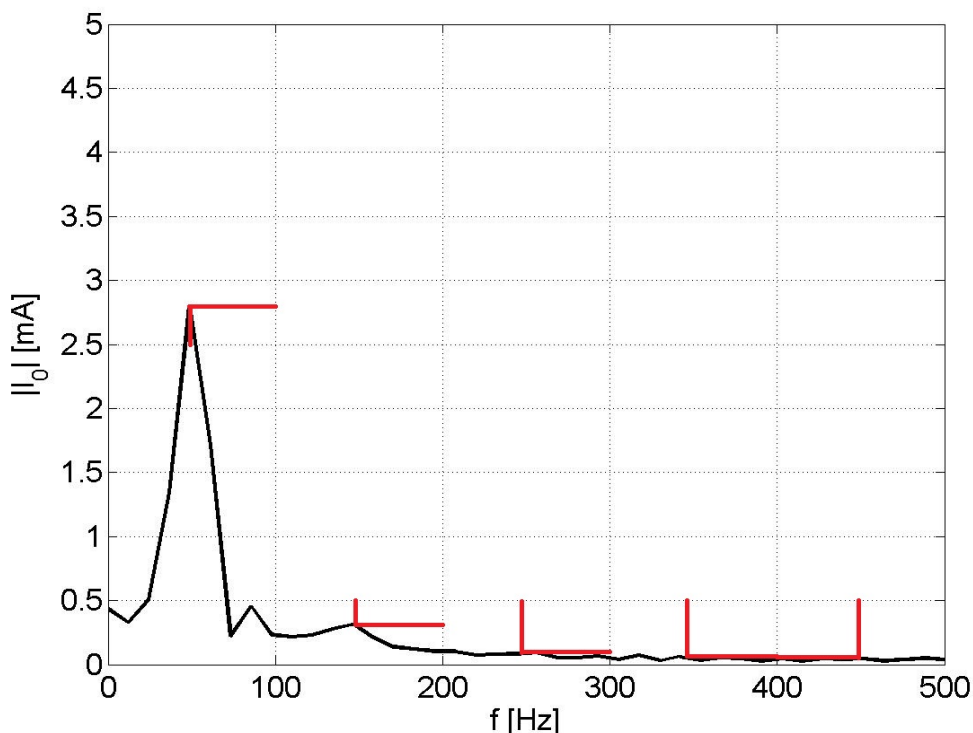
Tab. 3.6 Porovnání parametrů náhradního schéma

3.7 Vyhodnocení vyšších harmonických magnetizačního proudu



Obr 3.7 Časový průběh proudu naprázdno pro 200V

Pomocí rychlé Furierovy transformace (FFT) jsem převedl časový průběh do kmitočtové oblasti, z níž jsem provedl odečty hodnot pro 50Hz a jednotlivé vyšší harmonické.



Obr 3.8 Zobrazení proudu v kmitočtové oblasti

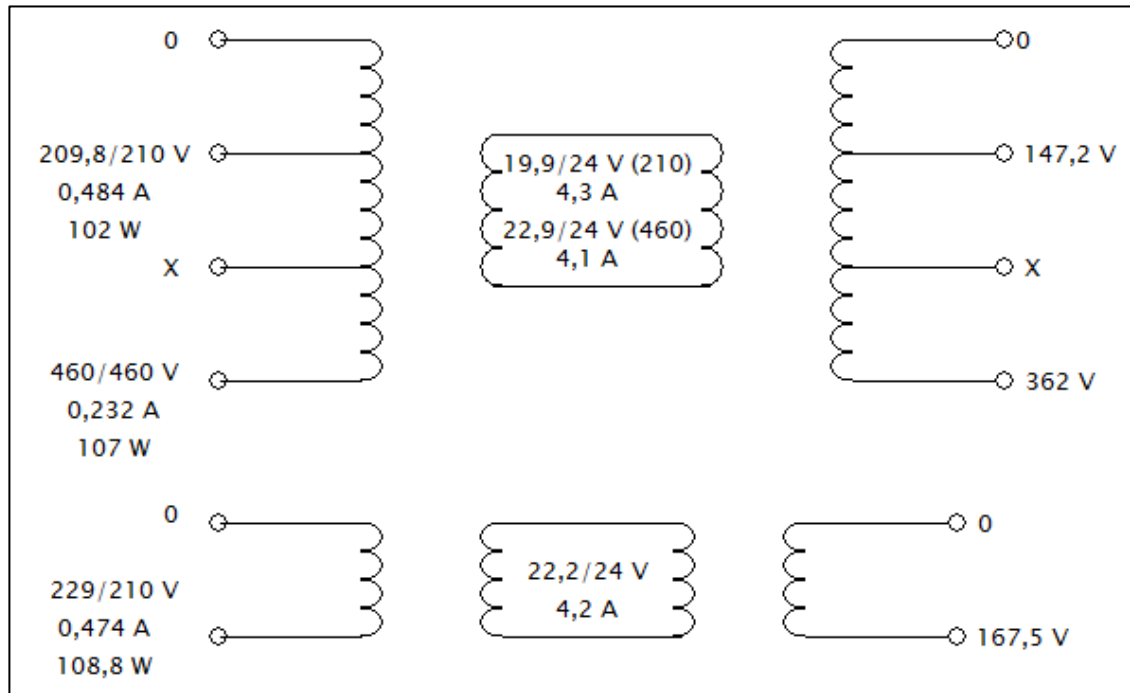
Tabulka shrnuje jednotlivé vyšší harmonické proudů naprázdno při různých napájeních. Třetí harmonická dosahuje vyšších hodnot při větším napájení, což potvrzuje teorii.

U [V]	I [mA]				
	1. harm	3. harm	5. harm	7. harm	9. harm
200	1,616	0,173	0,058	0,041	0,021
210	1,712	0,230	0,058	0,058	0,038
220	1,674	0,423	0,115	0,077	0,057
232	1,982	0,423	0,154	0,077	0,057

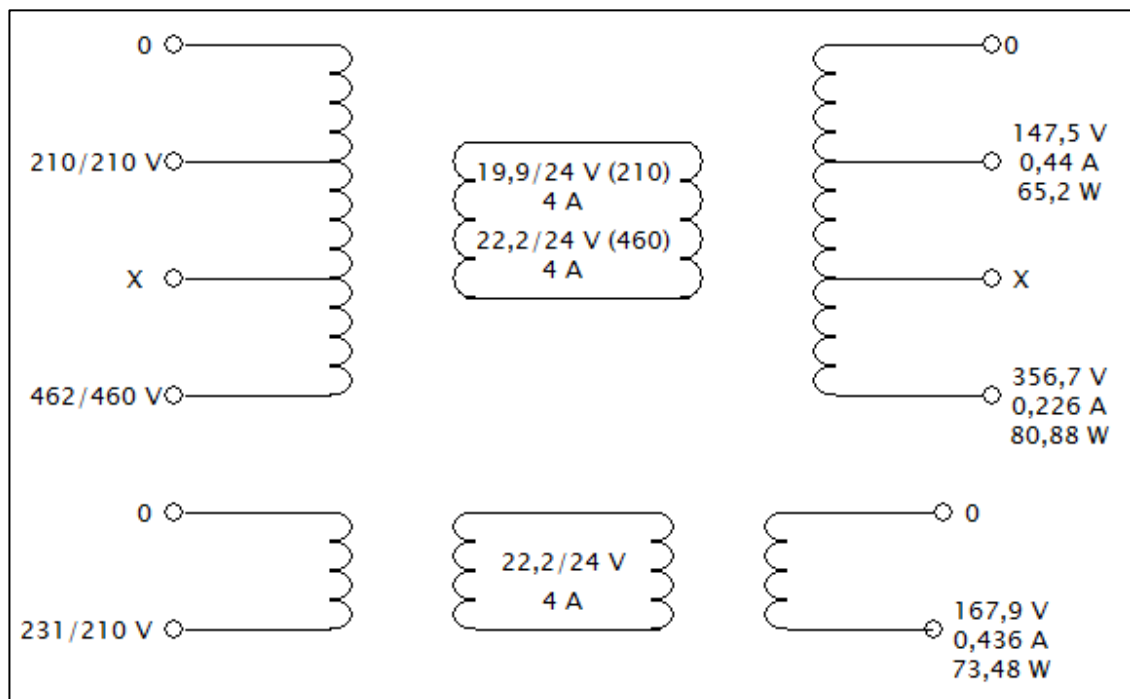
Tab. 3.9 Hodnoty proudů jednotlivých harmonických složek

3.8 Měření zatěžování do transformátoru

Na následujících dvou obrázcích jsou vyznačené schémata, kde jsou znázorněny veškeré změřené veličiny při měření zatěžování do transformátoru. Mezi sekundárními vinutími byl vždy připojený voltmetr a ampérmetr. Mezi schématy je rozdíl v zapojení analyzátoru DMG, jednou na primární straně TR1, podruhé na primární straně TR2. Pokaždé jsme se snažili nastavit jmenovitou hodnotu dané odbočky TR1.



Obr. 3.10 Zatěžování transformátorů 1



Obr. 3.11 Zatěžování transformátorů 2

3.8.1 Návrh vinutí speciálního transformátoru pro jmenovitý proud oběma vzorky při úsporném zapojení

Návrh vinutí transformátoru TR2 jsem provedl za účelem získání možnosti zatěžovat jej v úsporném zapojení (zatěžovaný do TR1) po připojení k síti (230 V) jmenovitými hodnotami. V našem případě jsme k měření použili odbočku 210 V a hodnotu napětí na primární straně TR1 jsme zvýšili na 230 V. Cílem bylo navrhnout vinutí primární i sekundární strany transformátoru TR2 tak, abychom získali jmenovité hodnoty na obou vzorcích. Použil jsem k tomu vzorce pro výpočet indukce B, indukovaného napětí U_i a převodu p. V prvním kroku jsem si určil indukci B, při napájení 229 V:

$$B = \frac{U_i}{4,44 \cdot S \cdot N \cdot f} = \frac{22,2}{4,44 \cdot 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 129 \cdot 50} = 1,076 [T]$$

Dále jsem určil indukované napětí U_i pro jeden závit sekundárního vinutí:

$$U_{iz} = 4,44 \cdot B \cdot S \cdot f = 4,44 \cdot 1,076 \cdot 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 50 = 0,172 [V/z]$$

Z indukovaného napětí na jeden závit jsem mohl určit žádaný počet závitů sekundárních stran vinutí pro jmenovité napětí 24 V:

$$N_2 = \frac{U_2}{U_{iz}} = \frac{24}{0,172} = 139,54 \Rightarrow 140 [-]$$

Počet závitů původního transformátoru byl 129 závitů, je tedy třeba zvýšit tento počet o 11 závitů na 140, abychom dosáhli 24 V při tomto zatížení. Pomocí převodu mohu též určit hledaný počet závitů primární strany TR2 pro odbočku na 230 V:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow N_1 = N_2 \cdot \frac{U_1}{U_2} = 140 \cdot \frac{230}{24} = 1341,66 \Rightarrow 1342 [-]$$

Počet závitů primární strany TR2 bude třeba navýšit o 177 závitů. Touto změnou vinutí primární strany TR2, kdy dosáhneme na 230 V, se zvýšil převod, $p = 9,03 \Rightarrow p = 9,55$. Došlo i k změně indukce $B = 1,127 T \Rightarrow B = 1,075 T$, tato změna o 4,83 % by neměla narušit funkci magnetického jádra.

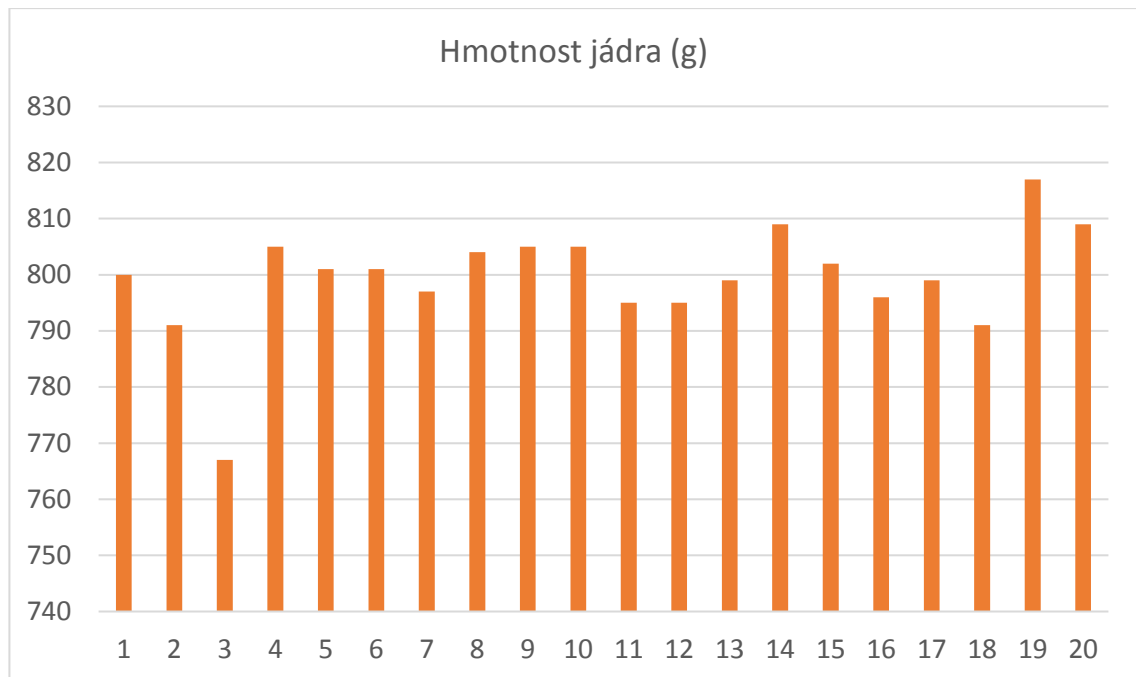
3.9 Měření a analýza firemních vzorků

Následující tabulky a grafy poskytnou shrnutí měření ve firmě CZECHMONT. Tabulka (Tab. 3.12) je stručná, jsou v ní naměřené elektrické veličiny na hotových vzorcích a vypočítané parametry náhradního schéma pro osm vybraných kusů z dvaceti celkových, které jsem vybral na základě naměřených proudů naprázdno, z nichž dva vzorky vykazovaly vysoké hodnoty (červené značení), dva nízké (modré) a zbývající čtyři (žluté), představující průměrné hodnoty zbylých vzorků, slouží pro porovnání. V grafech jsou pak obsaženy informace buď o těchto vybraných osmi vzorcích nebo o všech dvaceti, v závislosti na přehlednosti grafu.

čísla jader	1	2	3	5	6	7	9	20
měření naprázdno								
U10 [V]	230,1	230	230,2	231	229,5	229,1	230,2	230,7
I0 x 0,5 [mA]	9	33	42	10	14	15	15	15
P0 x 0,5 [W]	1,4	2,6	2,8	1,5	1,7	1,8	1,8	1,9
U2 [V]	25,52	25,48	25,36	25,55	25,42	25,4	25,54	25,62
cos10 Φ [-]	0,61	0,32	0,26	0,59	0,52	0,48	0,48	0,49
měření naprázdno (napájení sekundární strany)								
U20 [V]	24	24	24	23,9	23,9	23,9	24,1	24,1
I0 x 0,5 [mA]	76	168	208	87	102	106	101	98
P0 x 0,5 [W]	1,2	2,1	2,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6
U1 [V]	219,1	218,5	220,4	218,8	218,4	218,4	220,1	219,8
cos20 Φ [-]	0,9	0,27	0,37	0,93	0,92	0,93	0,91	0,9
měření nakrátko								
U1k [V]	24,2	24	24	24	24	24	24	23,8
Ik x 0,5 [mA]	687	712	718	718	716	717	714	720
I2k [A]	3,14	3,25	3,3	3,28	3,28	3,27	3,26	3,28
Pk x 0,5 [W]	16,6	17,1	17,2	17,2	17,2	17,1	17,1	17,1
cosk Φ [-]	1	1	1	0,99	1	0,99	1	1
hodnoty parametrů náhradního schéma (index s značí napájení ze sek.)								
Rfe [kΩ]	83,10	43,56	42,15	78,30	63,05	63,63	63,94	62,77
Rfes [kΩ]	58,48	87,71	52,59	49,51	42,54	40,50	43,74	45,46
Lμ [kH]	0,21	0,05	0,04	0,18	0,12	0,11	0,11	0,11
Lμs [kH]	0,39	0,08	0,07	0,41	0,32	0,33	0,31	0,30
R1 = R2' [Ω]	34,87	33,37	33,09	33,09	33,18	33,14	33,28	32,73
X1 = X2' [Ω]	4,93	4,72	4,68	4,68	4,69	4,69	4,71	4,63
R2 [Ω]	0,43	0,41	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,40
X2 [Ω]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

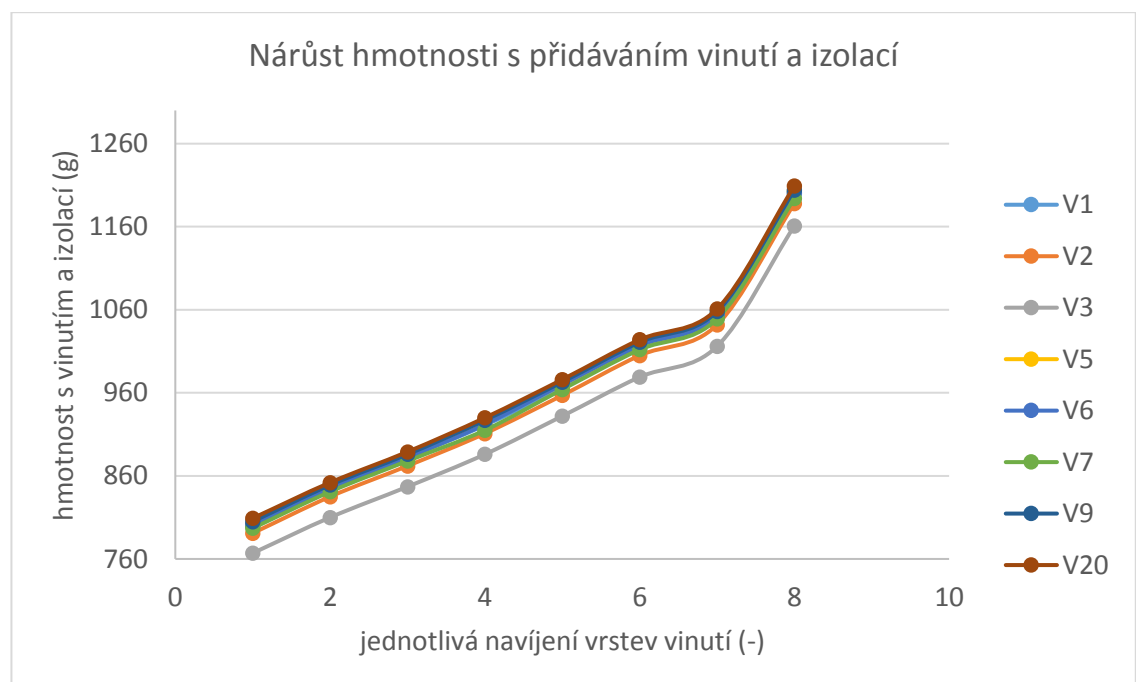
Obr. 3.12 Shrnutí naměřené a vypočítané hodnoty vybraných kusů traf

Z grafu, představující hmotnosti samotných jader, je zřejmé, že se transformátory začínají lišit již v počátku výroby, jádra mají jiné hmotnosti, což může být způsobeno rozdílným stříhem plechů, jejich navíjením nebo i broušením či lisováním.



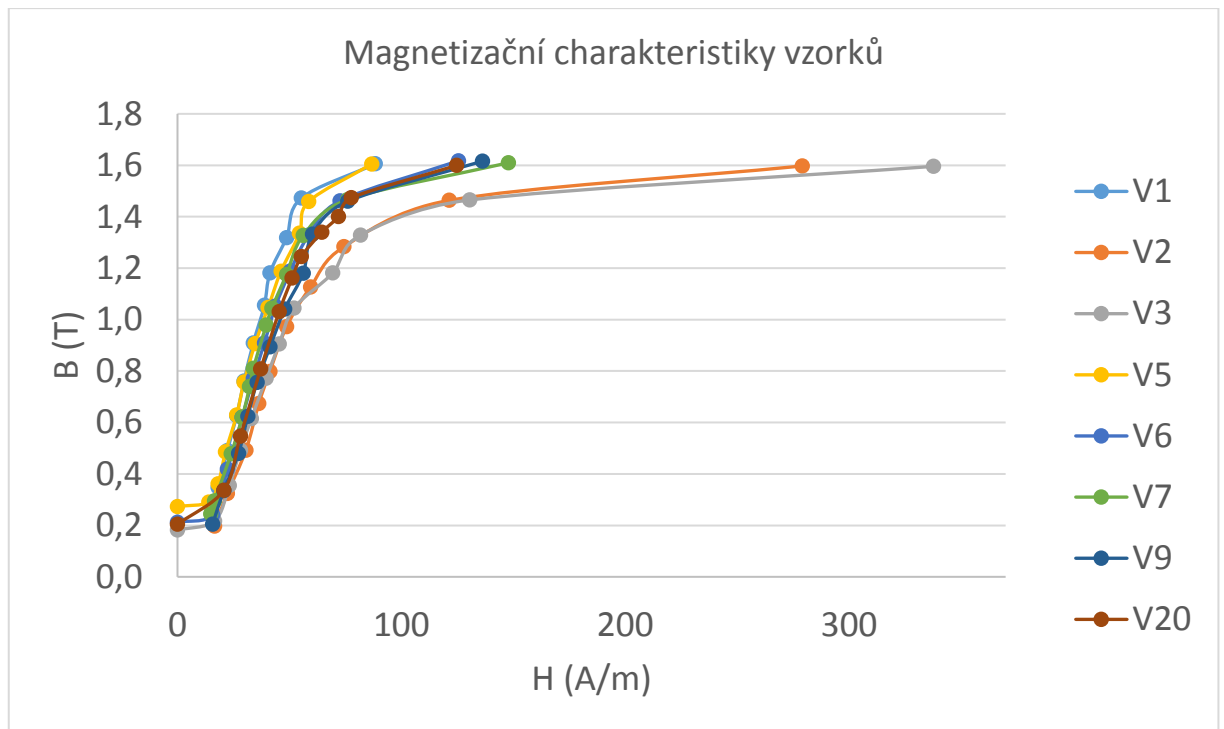
Obr. 3.13 Hmotnosti samostatných jader

Pro ilustraci výroby jsem též uvedl závislost nárůstu hmotnosti na jednotlivých krocích přidávání vinutí a izolační pásky (Obr. 3.14), poslední krok představuje přidání sekundárního vinutí, které má značně větší průměr než primární vinutí, a s tím jde i hmotnost strměji nahoru.



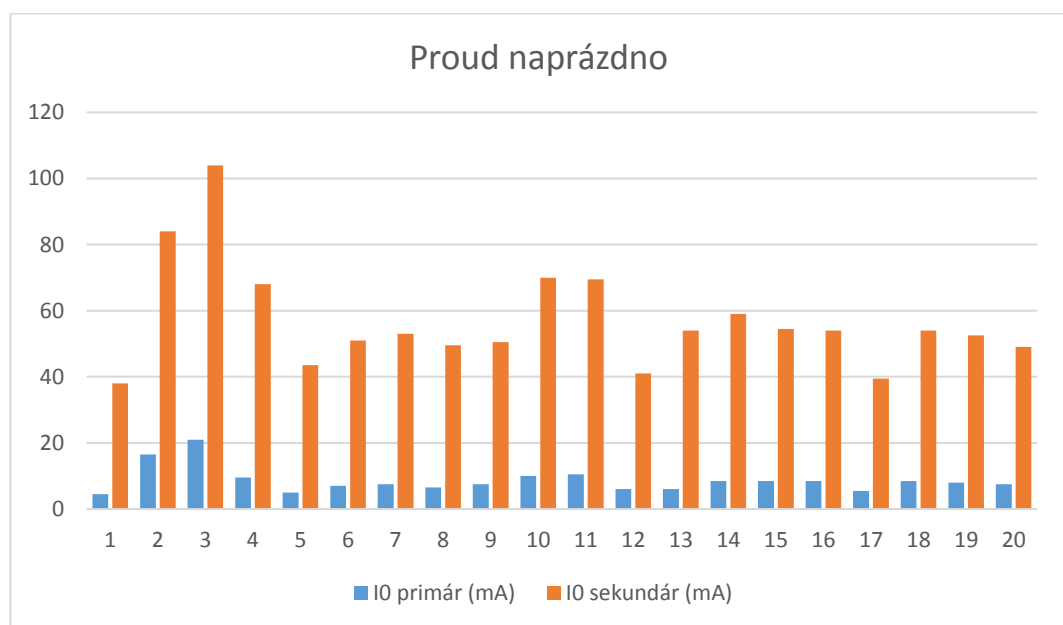
Obr. 3.14 Nárůst hmotnosti s přidáváním vinutí

Magnetizační charakteristiky (Obr. 3.15) nám jasně znázorňují rozdíl mezi mnou vybranými osmi vzorky. Graf ukazuje, že v rámci jedné šarže se mohou vzorky lišit v parametru H až o téměř 400 %. ($V5 - H = 86,7 \text{ A/m}$ a $V3 - H = 337,8 \text{ A/m}$, při $B = 1,6 \text{ T}$)

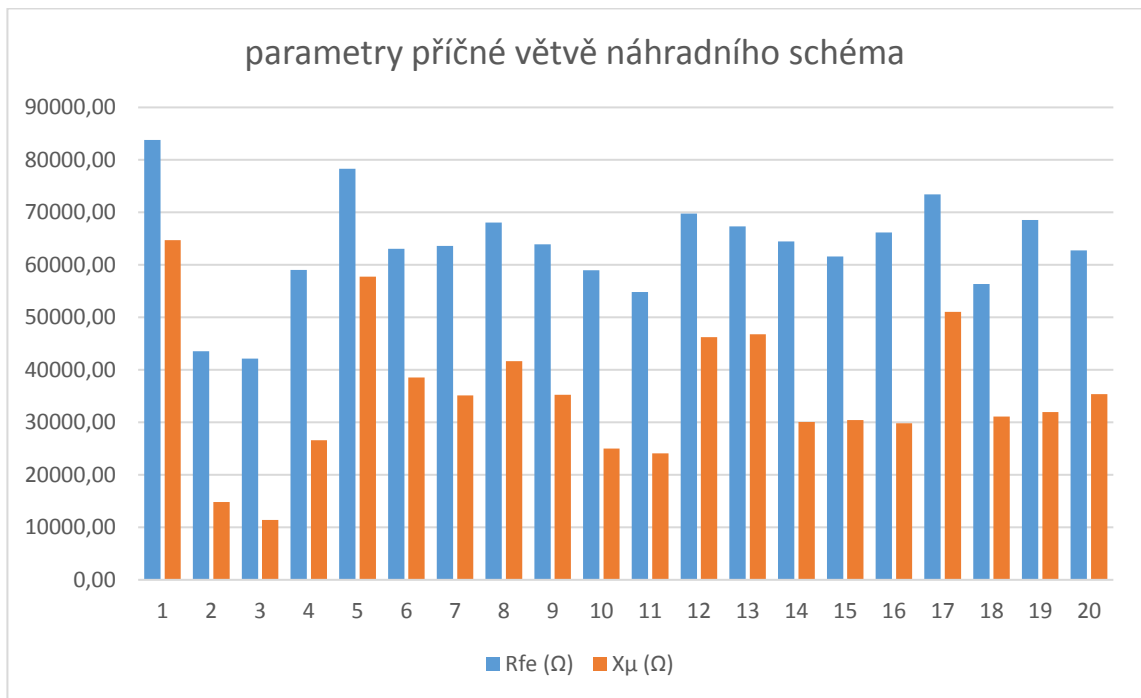


Obr. 3.15 Magnetizační charakteristiky vybraných kusů traf

Velikosti proudů naprázdno jsem zanesl do grafu (Obr. 3.16) pro obě napájení, proudy jsou velikostně úměrné. S přihlédnutím na hmotnosti jader (Obr. 3.13) je patrné, že stavba jádra má vliv na tuto veličinu, což je zjevné i z parametrů příčné větve (Obr. 3.17), které vystihují vlastnosti magnetického obvodu, tedy jádra.

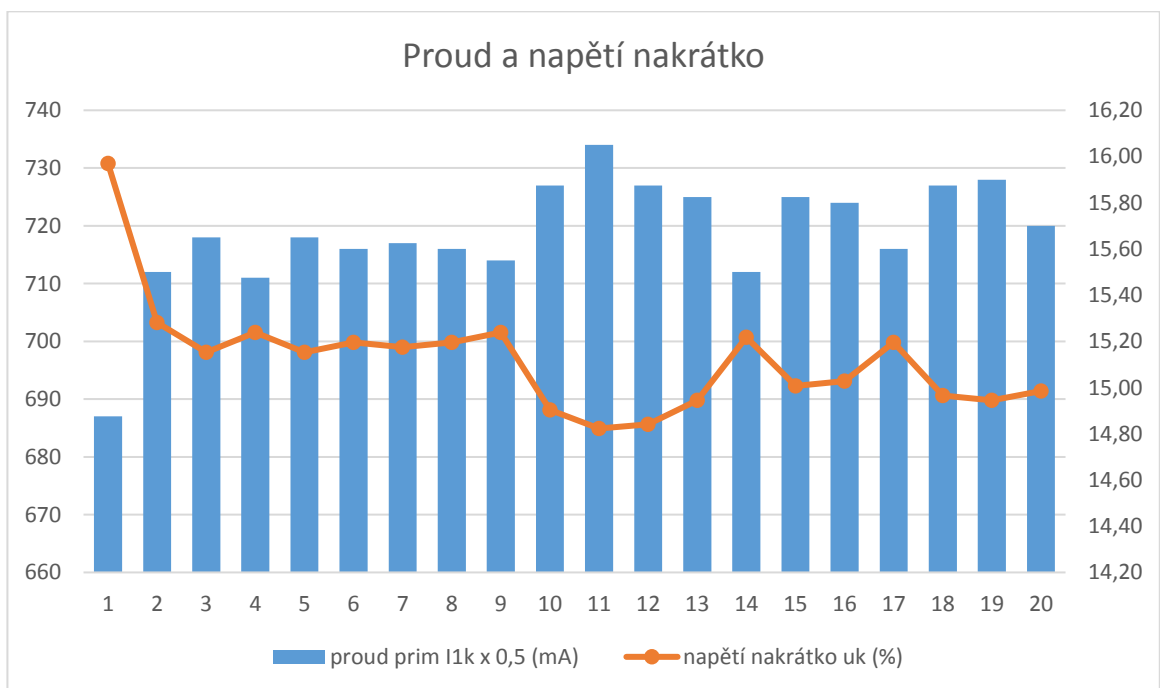


Obr. 3.16 Proudů naprázdno



Obr. 3.17 Parametry příčné větve

Z Obr. 3.18 je zřejmé, že jednoznačně nejtvrdějším transformátorem je hned první vzorek (nejvyšší impedance). Naopak nejměkčími zdroji jsou vzorky V10, V11, V12, V18 a V19.

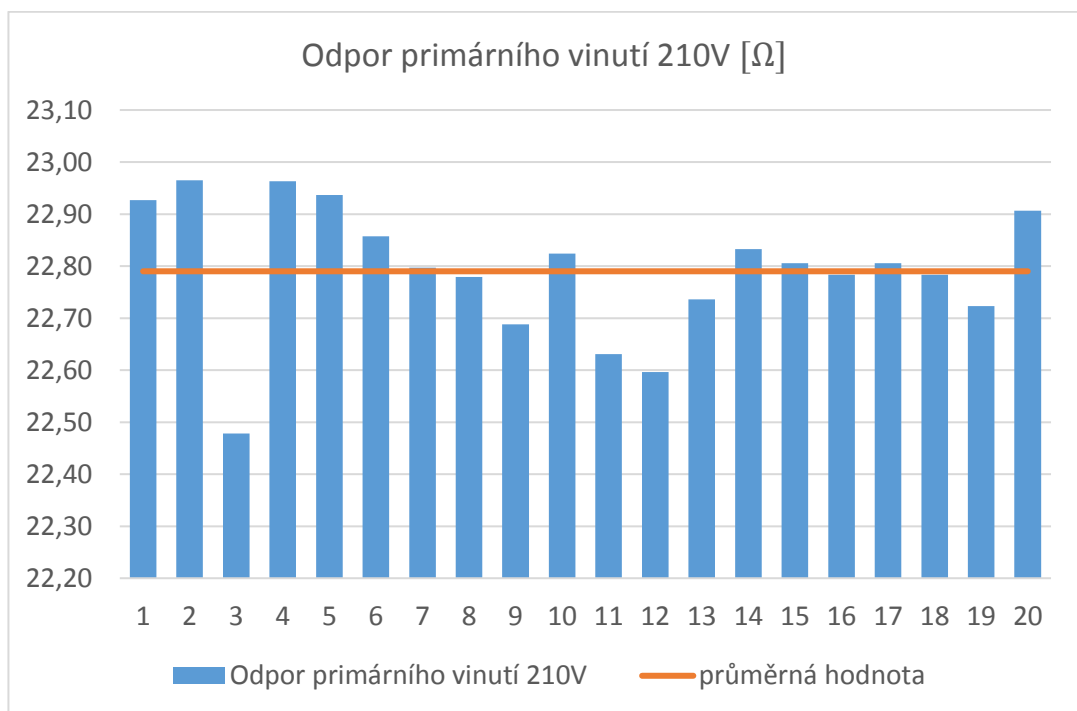


Obr. 3.18 Napětí nakrátko a proud nakrátko

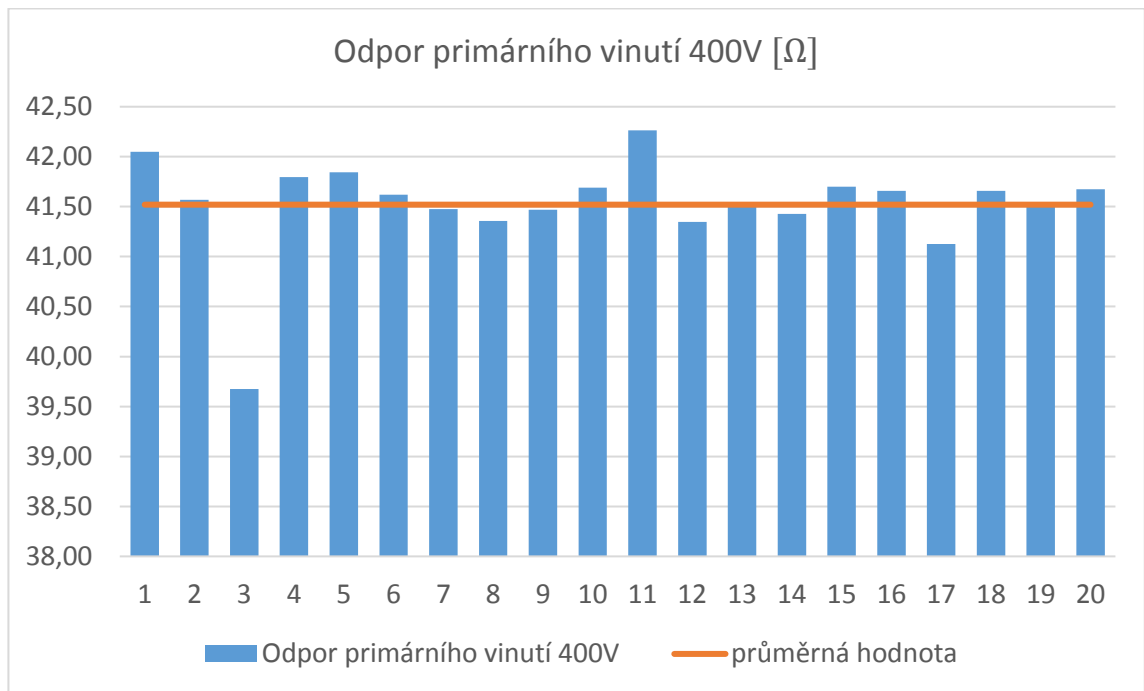
Následující tabulka (Tab. 3.19) je stručná opět pro osm vybraných kusů, kompletní tabulka (včetně původních hodnot napětí a proudů) je k dispozici v příloze. Tento výběr má pouze estetický význam kvůli velikosti tabulky, jelikož těchto osm vzorků jsem vybral na základě proudu naprázdno, který nemá na odpor vinutí značný vliv. Výjimku tvoří vzorek V3, kde odpor všech primárních odboček je výrazně nižší a již z předchozích grafů je patrné, že tento rozptyl souvisí s jakostí jádra. Jeho rozměry jsou pravděpodobně menší a tím pádem se na něj navinulo méně vinutí, co se týče délky (množství navinutých závitů je dáno počtem otáček navíjecího přístroje kolem jádra), tím pádem menší odpor. Nicméně grafy jsou znázorněny pro všechny kusy. Tabulka (Tab. 3.24) umístěná pod grafy shrnuje rozdíly mezi naměřenými odpory.

měření/výpočet odporů vinutí								
číslo trafo	1	2	3	5	6	7	9	20
R _{p1} [Ω]	22,93	22,97	22,48	22,94	22,86	22,80	22,69	22,91
R _{p2} [Ω]	42,05	41,57	39,67	41,84	41,62	41,48	41,47	41,67
R _{p3} [Ω]	48,78	49,03	48,03	48,94	48,67	48,18	48,24	48,70
R _s [Ω]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,44	0,47	0,44	0,45

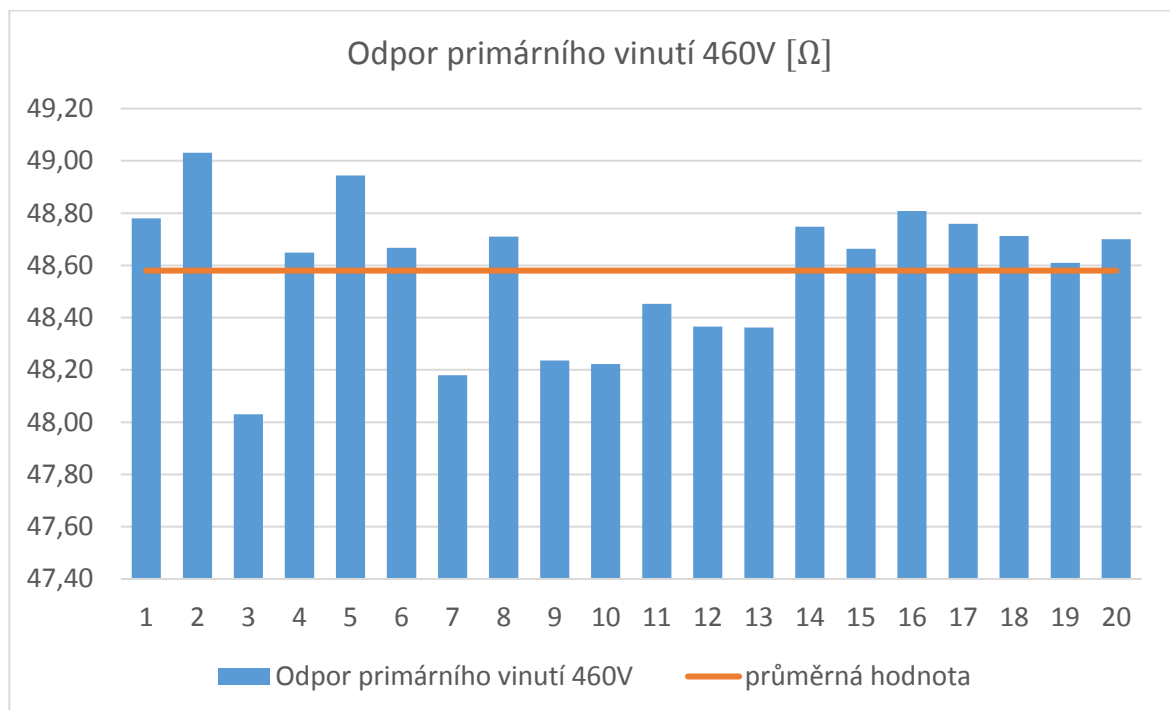
Tab. 3.19 Odpory jednotlivých odboček



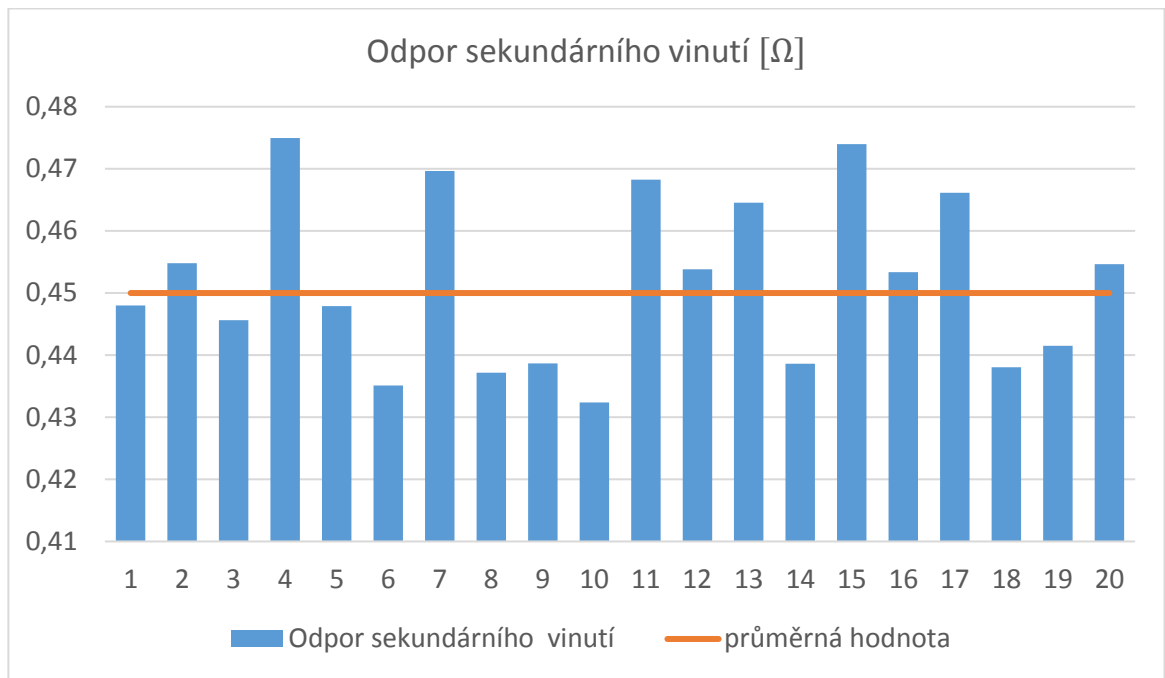
Obr. 3.20 Odpor vinutí odbočky 210V



Obr. 3.21 Odpor vinutí odbočky 400V



Obr. 3.22 Odpor vinutí odbočky 460V



Obr. 3.23 Odpor sekundárního vinutí

Rozptyly hodnot odporů [%]		
	max. a min. hodnoty	průměrný
Rp1	2,18 (V2, V3)	0,4
Rp2	6,53 (V11, V3)	0,68
Rp3	2,082 (V2, V3)	0,46
Rs	9,85 (V4, V10)	2,59

Tab. 3.24 Rozptyly hodnot odporů

Závěr

Cílem mé práce bylo provést základní analýzu dvou předložených stejných kusů transformátorů, provést na nich měření naprázdno, nakrátko a následně porovnat jejich parametry náhradního schéma. Dále dva stejné transformátory zatěžovat v úsporném zapojení a navrhnout počet závitů jednoho kusu tak, aby oba vzorky bylo možné zatěžovat na síti při jmenovitém proudu. Nad rámec zadání mé práce bylo pak provedeno rozsáhlé měření pro firmu CZECHMONT, které posloužilo k získání cenných podkladů pro důkladnou analýzu výrobního postupu a funkce transformátorů samotných, ze kterých pak může firma těžit. Před praktickou částí práce jsem uvedl základní informace o transformátorech a teorii o prováděných měřeních.

Z porovnání dvou obdržených vzorků je již z měření patrné, že se hodnoty proudu získané měřením naprázdno mohou velmi lišit, konkrétně o 27,77 %. Spolu s podobně rozdílným účínkem (24,73%) jsme dosáhli výpočtem velmi rozdílných hodnot indukční reaktance magnetického obvodu a indukčnosti (obojí cca 119 %), tyto hodnoty jsou ukazatelem kvality magnetického jádra. Je tedy zřejmé, že při výrobě transformátorů dochází už z počátku, tedy při výrobě jádra, ke značným rozdílům, způsobených například kvalitou použitých plechů nebo jejich skládáním, a to má vliv na výslednou funkci. S podobným případem se můžeme setkat i u analýzy výroby, kterou jsem provedl u vzorku číslo 3. Hmotnost jádra je oproti ostatním kusům velmi nízká, z naměřených hodnot dosahuje proud naprázdno tohoto vzorku značně vyšších hodnot, je mu totiž kladen nižší odpor magnetického obvodu, což je patrné z parametrů příčné větve.

Jedním z dalších cílů práce bylo dimenzování počtu závitů odbočky 210 V jednoho z traf tak, abychom ji mohli připojit na síť 230 V a zatěžovat tak oba transformátory v úsporném zapojení jmenovitým proudem. Obecně tedy bylo třeba vyrovnat úbytek napětí, který vznikl na transformátoru, přes který se vracela energie zpět do sítě, a k tomu ještě navýšit počet závitů tohoto trafa, abychom měli 230 V jmenovitých. Návrh jsem provedl pomocí jednoduchých vzorců a zvýšil počet závitů sekundární strany daného transformátoru o 11 závitů a počet závitů primární strany o 177 závitů. Nejedná se o značnou změnu, která by měla narušit funkci trafa.

Velkou pozornost při vypracování mé bakalářské práce jsem věnoval měření dvaceti kusů vybraných transformátorů při výrobním procesu za účelem získání maxima hodnot, ze kterých je pak možno vyvodit výsledky kvality výroby, popřípadě materiálů samotných. U všech vzorků jsem vypočítal parametry náhradního schéma z naměřených hodnot naprázdno a nakrátko, navíc jsem udělal i měření naprázdno při napájení ze sekundární strany, což mi poskytlo získání většího množství údajů o jednotlivých vzorcích. Na závěr jsem provedl i měření odporů vinutí. Ze získaných údajů jsem vytvořil několik grafů, poskytující základní informace a přehled o kvalitě vybraných transformátorů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

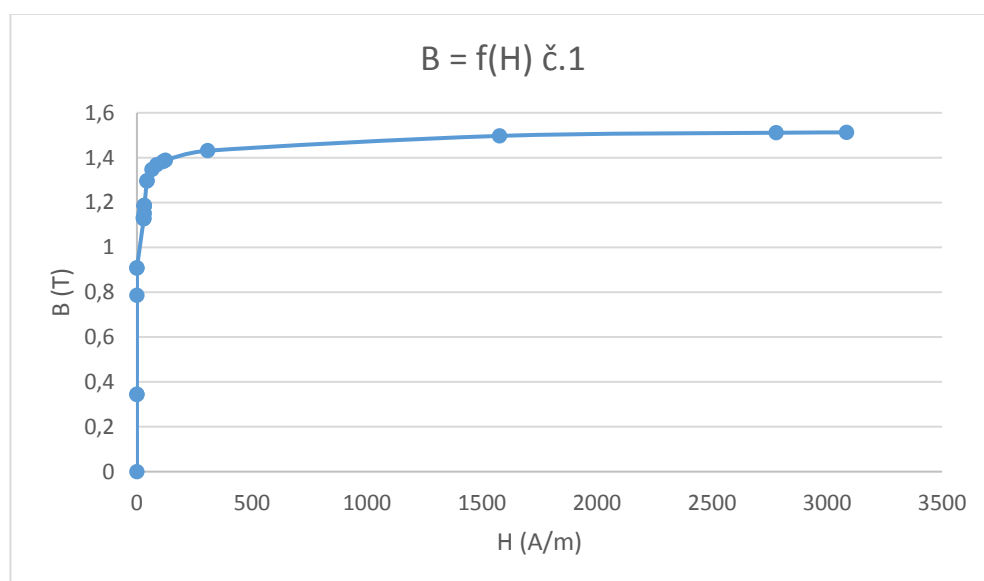
- [1] KOCMAN Karel, HOLBA Jozef, IHLÁR Alexander, MRAVEC Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje I*. Vydalo SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51 113 02 Praha v roce 1990.
- [2] G. N. PETROV. *Elektrické stroje 1*. Nakladatelství Československé akademie věd. Praha 1980
- [3] BARTOŠ Václav, ČERVENÝ Josef, HRUŠKA Josef, KOTLANOVÁ Anna, SKALA Bohumil. *Elektrické stroje*. Západočeská univerzita v Plzni, 2011
- [4] FAKTOR Zdeněk. *Transformátory a cívky*. BEN – technická literatura, Praha 1999
- [5] BARTOŠ Václav, SKALA Bohumil. *Měření na elektrických strojích*. Západočeská univerzita v Plzni, 2006.
- [6] BARTOŠ Václav. *Teorie elektrických strojů*. Západočeská univerzita v Plzni, 2006
- [7] SKALA Bohumil. *Měření a zkoušení elektrických zařízení*. Západočeská univerzita v Plzni, 2015
- [8] Elektronické komponenty: *Panelový měřič výkonu DMG800* [online]. 2017 (cit. 30.4. 2017). Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/details/dmg800/panelova-meridla-digitalni/lovato-electric/dmg-800/>
- [9] Electronics tutorials: *Transformer loading* [online]. 2017(cit. 11.5.2017). Dostupné z: <http://www.electronics-tutorials.ws/transformer/transformer-loading.html>
- [10] Sciencing: *Types of electrical loading* [online]. 2017(cit. 11.5.2017). Dostupné z: <http://sciencing.com/types-electrical-loads-8367034.html>
- [11] Electrical engineering course: *The three types of electrical loads* [online]. 2017(cit. 11.5.2017). Dostupné z: <http://electrical-engineeringcourse.blogspot.cz/2011/06/types-of-loads.html>
- [12] Electrical know-how: *Electrical loads classification and types* [online]. 2017(cit. 11.5.2017). Dostupné z: http://www.electrical-knowhow.com/2012/03/electrical-load-classification-and_06.html
- [13] Velkoobchod CONRAD: *Toroidní transformátory* [online]. 2017 (cit. 24.5.2017). Dostupné z: <https://velkoobchod.conrad.cz/toroidni-transformator-sedlbauer-2x-12-v-50-va.k607136>

Přílohy

Tabulka představuje naměřené a dopočítané veličiny pro konstrukci magnetizační charakteristiky vzorku č. 1

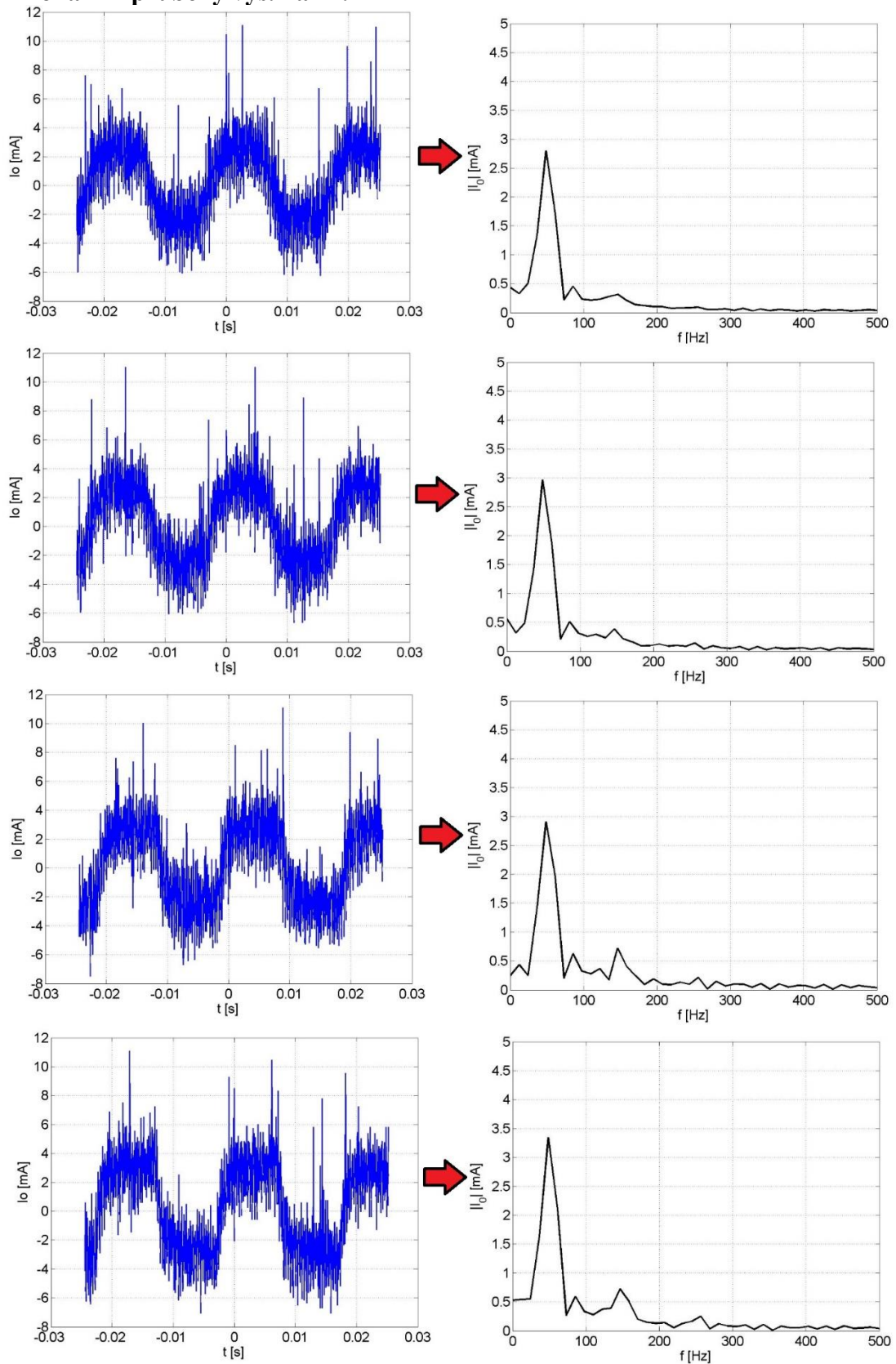
Příloha A – tabulka a graf magnetizační charakteristiky vzorek č.1

U ₀ (V)	I ₀ (A)	U ₀ s R (V)	B (T)	H (A/m)
0,0	0,000	0,00	0,00	0,00
64,0	0,000	64,02	0,34	0,00
64,1	0,000	64,12	0,34	0,00
146,3	0,000	146,32	0,79	0,00
169,1	0,000	169,06	0,91	0,00
169,2	0,000	169,23	0,91	0,00
209,8	0,004	209,76	1,13	29,54
210,1	0,004	209,98	1,13	29,54
210,2	0,004	210,12	1,13	30,21
210,6	0,003	210,57	1,13	28,19
214,3	0,004	214,21	1,15	31,22
220,6	0,004	220,48	1,18	32,22
220,7	0,004	220,57	1,18	32,22
220,8	0,004	220,68	1,19	32,22
221,1	0,004	221,05	1,19	32,56
241,3	0,005	241,22	1,30	43,30
241,6	0,005	241,47	1,30	44,31
250,9	0,008	250,75	1,35	65,45
254,8	0,010	254,59	1,37	85,59
257,6	0,014	257,26	1,38	114,46
258,6	0,015	258,29	1,39	123,86
266,5	0,037	265,65	1,43	306,79
278,8	0,188	274,65	1,50	1577,24
281,4	0,331	274,13	1,51	2778,55
281,7	0,368	273,60	1,51	3084,66



Na následujících obrázcích jsou zobrazeny časové průběhy proudů převedené do kmitočtové oblasti při napájení sestupně od 200V, 210V, 220V a 232V.

Příloha B – průběhy vyš. harm.



Následující tabulka poskytuje kompletní přehled postupu výroby transformátorů v CZECHMONTU pro 9 vzorků, zbývajících 11 jsem vynechal kvůli rozměrnosti tabulky, tabulku jsem rozdělil na dvě části.

Příloha C - výroba transformátorů (první půlka)

číslo jádra	c [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
druh stříhu (šikmý-1, šíp-2, jiný-3)	s [-]	2	2	2	2	2	2	2	2	2
hmotnost samotného jádra	mFe [g]	800	791	767	805	801	801	797	804	805
abnormality (zkosení hran, svary,...popis, soubor s foto...)										
vnitřní průměr	dFe [mm]	45	45	45,1	45	45,1	45	45	45,1	45
vnější průměr	Dfe [mm]	81,2	81	80,5	82,2	81,9	81,6	81,7	81,8	82
výška	sFe [mm]	x	x	x	x	x	x	x	x	30,1
ovinutí jádra izolační páskou										0,6
hmotnost ovinutého jádra izolační páskou	m2 [g]	810	802	777	816	811	812	807	815	817
hmotnost izolace	mi [g] = m2 - mFe	10	11	10	11	10	11	10	11	12
vnitřní průměr	di [mm]	43,4	43	43,4	43,3	43,1	43,5	43,3	43,5	43,2
vnější průměr	Di [mm]	81,9	82	81,5	82,9	82,6	82,3	82,4	82,5	82,6
výška	si [mm]	31,3	31,2	30,6	30,5	31,3	31,2	31,2	31,1	31,2
navinutí 1. primáru										
rychlost otáčení magazínu										
čas navinutí vrstvy 1	t1 [s] "3"	25,85	24,93	22,91	23,65	25	24,62	24,15	24,68	24,31
hmotnost ovinutého jádra s 1. vrstvou	m3.1 (g)	844	835	810	849	845	845	841	848	849
hmotnost po zabandažování 1. vrstvy izo. páskou	m3.2 [g]	849	840	815	854	850	850	846	853	854
hmotnost 1. vrstvy	m3.1.1 (g) = m3.1 - m2	34	33	33	33	34	33	34	33	32
hmotnost izolace	mi3 [g] = m3.2 - m3.1	5	5	5	5	5	5	5	5	5
vnější průměr po bandáži 1. vinutí	Di3 [mm]	83,9	83,5	83	83,9	83,2	84	83,4	83,9	84,2
čas navinutí vrstvy 2	t2 [s] "4"	26	25,88	25,6	25,9	26	26,19	26	25,57	25,51
hmotnost s 2. vrstvou	m4.1 [g]	882	872	847	887	882	882	878	885	886
hmotnost po zabandažování 2. vrstvy	m4.2 (g)	887	877	852	892	888	888	883	892	892
hmotnost 2. vrstvy	m4.1.1 (g) = m4.1 - m3.2	33	32	32	33	32	32	32	32	32
hmotnost izolace	mi4 (g) = m4.2 - m4.1	5	5	5	5	6	6	5	7	6
vnější průměr po bandáži 2. vinutí	Di4 [mm]	85,1	84,5	84,1	84,7	84,3	84,4	84	85	84,6
čas navinutí vrstvy 3	t3 [s] "5"	26	26,64	26	26,3	26,65	26	25,72	27,54	28,16
hmotnost s 3. vrstvou	mi5.1 [g]	921	911	886	927	923	922	915	925	927
hmotnost 3. vrstvy	m5.1.1 (g) = m5.1 - m4.2	34	34	34	35	35	34	32	33	35
vnitřní průměr (přibližně konstantní, +/- 0,1 mm)	d5 [mm]	39	39	39	39	39	39	39	39	39
vnější průměr	D5 [mm]	86	85,7	84,8	86,3	85,1	85	85,6	85,4	86,1
výška	s5 [mm]	36,1	35,9	35,8	35,7	36,1	36,3	35,8	36	36
proběhlo letování, poté bandáž										
hmotnost s ovinutým primárem izolací	m5.2 [g]	927	918	892	933	929	929	923	932	933
hmotnost izolace	mi5 [g] = m5.2 - m5.1	6	7	6	6	6	7	8	7	6
vnitřní průměr (přibližně konstantní, +/- 0,1 mm)	di5 [mm]	38	38	38	38	38	38	38	38	38
vnější průměr	Di5 [mm]	86	85,9	85	86,4	85,8	85,9	86,1	86,2	86,3
výška	si5 [mm]	x	x	x	x	x	x	x	x	x
navinutí 2. primáru										
čas navinutí 1. vrstvy	"6"	31	31,5	31	31,7	31,85	31,22	31,5	31,88	31,88
hmotnost s 1. vrstvou	m6.1 (g)	966	957	932	974	970	970	964	973	973
hmotnost 1. vrstvy	m6.1.1 (g) = m6.1 - m5.2	39	39	40	41	41	41	41	41	40
vnitřní průměr (přibližně konstantní, +/- 0,1 mm)	d6 (mm)	37	37	37	37	37	37	37	37	37
vnější průměr	D6 (mm)	87	87	86,1	87	86,7	86,5	87,2	87,1	86,8
výška	s6 (mm)	38	37,8	37,2	37,9	38	37,6		38	38
hmotnost po zabandažování (přibližně konstantní m6.1	m6.2 (g)	972	963	938	980	976	975	970	978	979
vnitřní (konstantní)	di6 (mm)	36	36	36	36	36	36	36	36	36
výška (s6 + cca0,3mm)	si6 (mm)									

Příloha C – výroba transformátorů (druhá půlka)

čas navinutí 2. vrstvy	"7"	29,57	29,3	29,53	28,9	29	29,5	29,57	30	30
hmotnost s 2. vrstvou	m7.1 (g)	1014	1005	979	1022	1017	1017	1012	1020	1021
hmotnost 2. vrstvy	m7.1.1. (g) = m7.1 - m6.2	42	42	41	42	41	42	42	42	42
vnější průměr	D7 (mm)	88,5	88,9	87,8	88,7	87,3	87	88,2	88,3	88,6
vnitřní	d7 (mm)	34	34	34	34	34	34	34	34	34
výška	S7 (mm)	39,7	39,5	39	39,5	39,9	39,3	39,3	39,7	39,8
<i>proběhlo letování, poté bandáž</i>										
hmotnost po zabandážování izolací	m7.2 (g)	1020	1011	985	1028	1024	1024	1018	1027	1027
hmotnost izolace	mi7 (g)	6	6	6	6	7	7	6	7	6
vnější	Di7 (mm)	89	89,1	88	87,6	88,4	87,9	88,8	88,8	88,9
vnitřní	di7 (mm)	33	33	33	33	33	33	33	33	33
čas navinutí 3. vrstvy (zrychlení natáčení vinutí o 10s)	"8"	20,1	20	20,21	20,5	20,3	20	19,56	20	19,9
hmotnost s 3. vrstvou	m8.1 (g)	1051	1042	1016	1059	1055	1054	1049	1057	1058
hmotnost 3. vrstvy	m8.1.1. (g) = 8.1 - 7.2	31	31	31	31	31	30	31	30	31
vnější průměr	D8 (mm)	89,1	89,2	88,1	88,9	89	88,8	89	89	89,4
<i>rozměry bude třeba brát s jistou rezervou vlivem nerovnoměrného rozložení závitů (mohou se překrývat, ale také mezi nimi může být mezera)</i>										
<i>proběhlo vyvedení kontaktů primáru (modrá, hnědá, zelená, červená)</i>										
hmotnost po vyvedení přívodních drátů	m8 (g)	x	x	x	1089	1086	1085	1079	1088	1089
hmotnost přívodních drátů		x	x	x	30	31	31	30	31	31
hmotnost po zabandážování izolací	m8.2. (g)	1096	1087	1061	1103	1100	1100	1093	1102	1104
hmotnost izolace (s ovinutím černé pásky)	m8.2.1 (g) = 8.2 - m8	x	x	x	14	14	15	14	14	15
vnější průměr	Di8 (mm)	91,1	89,6	89,3	90,7	90,2	89,8	89,6	90,3	90,4
vnitřní (stále konstantí +/- 0,3 mm)	di8 (mm)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
navinutí sekundáru	"9"									
hmotnost se sekundárem	m9.1 (g)	1200	1188	1161	1204	1203	1201	1194	1203	1204
hmotnost sekundáru	m9.1.1. (g)	104	101	100	101	103	101	101	101	100
vnější rozměr	Di9 (mm)	92	91,2	91	92,4	91,4	91,6	90,8	91,1	91,4
výška	S9 (mm)	43,2	42	43	43,5	43,3	43,8	44	43,4	43
vnitřní (+/- 0,5mm)	di9 (mm)	28	28	28	28	28	28	28	28	28

Poslední tabulka shrnuje přehled naměřených a následně vypočítaných veličin, ze kterých jsou odvozené některé grafy.

Příloha D – naměřené a vypočítané hodnoty

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
měření naprázdno										
napětí	U10 [V]	230,06	230	230,2	230	231	229,5	229,1	230	230,2
proud	I10 x 0,5 [mA]	9	33	42	19	10	14	15	13	15
ztráty	P0 x 0,5 [W]	1,4	2,6	2,8	2	1,5	1,7	1,8	1,6	1,8
napětí výstupu	U2 (V)	25,52	25,48	25,36	25,24	25,55	25,42	25,4	25,65	25,54
účinnost	cos10 Φ (-)	0,61	0,32	0,26	0,41	0,59	0,52	0,48	0,52	0,48
	sin10 Φ (-)	0,79	0,94	0,96	0,91	0,8	0,85	0,87	0,85	0,87
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
měření naprázdno (napájení sekundáru)										
napětí	U20 (V)	24	24	24	23,9	23,9	23,9	23,9	24	24,1
proud	I20 x 0,5 (mA)	76	168	208	136	87	102	106	99	101
ztráty	P0 x 0,5 (W)	1,2	2,1	2,2	1,7	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6
napětí výtupu	U1 (V)	219,1	218,5	220,4	220,2	218,8	218,4	218,4	217,4	220,1
účinnost	cos20 Φ (-)	0,9	0,27	0,37	0,92	0,93	0,92	0,93	0,94	0,91
	sin20 Φ (-)	0,43	0,96	0,92	0,39	0,36	0,39	0,36	0,34	0,41
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
měření nakrátko										
napětí	U1k [V]	24,2	24	24	23,9	24	24	24	24	24
proud prim	I1k x 0,5 (mA)	687	712	718	711	718	716	717	716	714
proud sek	I2k [A]	3,14	3,25	3,3	3,27	3,28	3,28	3,27	3,28	3,26
ztráty	Pk x 0,5 [W]	16,6	17,1	17,2	17,1	17,2	17,2	17,1	17,2	17,1
účinnost	cosk Φ (-)	1	1	1	1	0,99	1	0,99	1	1
převod	p1 (-)	9,01	9,03	9,08	9,11	9,04	9,03	9,02	8,97	9,01
převod (napájení ze sekundáru)	p2 (-)	9,13	9,10	9,18	9,21	9,15	9,14	9,14	9,06	9,13
		1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
příkon odebíraný ze zdroje	S10 (VA)	1,04	3,80	4,83	2,19	1,16	1,61	1,72	1,50	1,73
příkon odebíraný ze zdroje (napájení ze sekundáru)	S20 (VA)	0,91	2,02	2,50	1,63	1,04	1,22	1,27	1,19	1,22
činná složka	P10 (W)	0,63	1,21	1,26	0,90	0,68	0,84	0,82	0,78	0,83
činná složka (napájení ze sekundáru)	P20 (W)	0,82	0,54	0,92	1,50	0,97	1,12	1,18	1,12	1,11
jalová složka	Q10 (VAr)	0,82	3,57	4,64	1,99	0,92	1,37	1,49	1,27	1,50
jalová složka (napájení ze sekundáru)	Q20 (VAr)	0,39	1,94	2,30	0,63	0,37	0,48	0,46	0,40	0,50
činný proud	Ife (A)	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
činný proud (napájení ze sekundáru)	Ife (A)	0,03	0,02	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
jalový proud	Iμ (A)	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
jalový proud (napájení ze sekundáru)	Iμ (A)	0,02	0,08	0,10	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
parametr Rfe	(Ω)	83810,56	43560,61	42161,17	59050,06	78305,08	63049,45	63638,89	68047,34	63944,44
parametr Rfe (napájení ze sekundáru)	(Ω)	58485,39	87709,89	52598,93	32429,48	49513,60	42535,29	40490,07	42322,84	43741,16
indukční reaktance Xm1	Xμ (Ω)	64714,49	14829,14	11418,65	26604,97	57750,00	38571,43	35111,11	41628,96	35279,69
indukční reaktance Xm1 (napájení ze sekundáru)	Xμ (Ω)	1468,79	297,62	250,84	901,21	1526,18	1201,61	1252,62	1426,02	1163,97
magnetizační indukčnost	Lμ (H)	206,10	47,23	36,37	84,73	183,92	122,84	111,82	132,58	112,36
magnetizační indukčnost (napájení ze sekundáru)	Lμ (H)	389,84	78,56	67,37	243,63	407,36	319,55	333,12	372,64	309,18
uk	(%)	15,97	15,28	15,15	15,24	15,15	15,20	15,17	15,20	15,24
Zk	(Ω)	70,45	67,42	66,85	67,23	66,85	67,04	66,95	67,04	67,23
Rk	(Ω)	69,75	66,74	66,18	66,56	66,18	66,37	66,28	66,37	66,55
Xk	(Ω)	9,86	9,44	9,36	9,41	9,36	9,39	9,37	9,39	9,41
R1 = R2'	(Ω)	34,87	33,37	33,09	33,28	33,09	33,18	33,14	33,18	33,28
X1 = X2'	(Ω)	4,93	4,72	4,68	4,71	4,68	4,69	4,69	4,69	4,71
R2	(Ω)	0,43	0,41	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,41
X2	(Ω)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Odpor primárního vinutí odbočky 210V	Rp1 (Ω)	22,93	22,97	22,48	22,96	22,94	22,86	22,80	22,78	22,69
Odpor primárního vinutí odbočky 400V	Rp2 (Ω)	42,05	41,57	39,67	41,80	41,84	41,62	41,48	41,36	41,47
Odpor primárního vinutí odbočky 460V	Rp3 (Ω)	48,78	49,03	48,03	48,65	48,94	48,67	48,18	48,71	48,24
Odpor sekundárního vinutí	Rs (Ω)	0,448	0,455	0,446	0,475	0,448	0,435	0,470	0,437	0,439

Tabulka představuje naměřené hodnoty napětí a proudů při měření odporů vinutí jednotlivých odboček a následně dopočtené jednotlivé odpory.

Příloha E – odpory vinutí

č.	I_p (mA)	U_1 (V)	U_2 (V)	U_3 (V)	I_s (mA)	U_s (mV)		R_{p1} (Ω)	R_{p2} (Ω)	R_{p3} (Ω)	R_s (Ω)
1	10,25	0,235	0,431	0,5	37,5	16,8	1	22,93	42,05	48,78	0,45
2	10,32	0,237	0,429	0,506	37,6	17,1	2	22,97	41,57	49,03	0,45
3	10,41	0,234	0,413	0,5	37,7	16,8	3	22,48	39,67	48,03	0,45
4	10,36	0,2379	0,433	0,504	37,9	18	4	22,96	41,80	48,65	0,47
5	10,42	0,239	0,436	0,51	38,4	17,2	5	22,94	41,84	48,94	0,45
6	10,5	0,24	0,437	0,511	38,15	16,6	6	22,86	41,62	48,67	0,44
7	10,44	0,238	0,433	0,503	37,9	17,8	7	22,80	41,48	48,18	0,47
8	10,47	0,2385	0,433	0,51	38,2	16,7	8	22,78	41,36	48,71	0,44
9	10,49	0,238	0,435	0,506	38,07	16,7	9	22,69	41,47	48,24	0,44
10	10,41	0,2376	0,434	0,502	37,7	16,3	10	22,82	41,69	48,22	0,43
11	10,34	0,234	0,437	0,501	37,8	17,7	11	22,63	42,26	48,45	0,47
12	10,4	0,235	0,43	0,503	37,9	17,2	12	22,60	41,35	48,37	0,45
13	10,38	0,236	0,431	0,502	38,1	17,7	13	22,74	41,52	48,36	0,46
14	10,38	0,237	0,43	0,506	38,3	16,8	14	22,83	41,43	48,75	0,44
15	10,48	0,239	0,437	0,51	38,4	18,2	15	22,81	41,70	48,66	0,47
16	10,49	0,239	0,437	0,512	38,38	17,4	16	22,78	41,66	48,81	0,45
17	10,48	0,239	0,431	0,511	38,4	17,9	17	22,81	41,13	48,76	0,47
18	10,49	0,239	0,437	0,511	38,35	16,8	18	22,78	41,66	48,71	0,44
19	10,43	0,237	0,433	0,507	38,05	16,8	19	22,72	41,51	48,61	0,44
20	10,39	0,238	0,433	0,506	38,27	17,4	20	22,91	41,67	48,70	0,45

Na závěr bych poskytl také tabulku, kdy jsme změřili transformátory při klasickém odporovém zatížení jmenovitými hodnotami.

Příloha F – zatěžování do odporu

Proudy a napětí pro jmenovité zatížení odporem			
vzorek č.1			
$U_1 = 229,8$ V	$I_1 = 0,47$ A	$U_2 = 23,1$ V	$I_2 = 4,06$ A
vzorek č.2			
$U_1 = 229,7$ V	$I_1 = 0,47$ A	$U_2 = 23,3$ V	$I_2 = 4,09$ A