



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A
VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTROMECHANICS AND POWER
ELECTRONICS**

ZTRÁTY V KONSTRUKČNÍCH ČÁSTECH TRANSFORMÁTORU

LOSSES IN CONSTRUCTION PARTS OF TRANSFORMER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S WORK

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VÁCLAV MUŽÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ BOUZEK

PLZEŇ 2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav MUŽÍK**
Osobní číslo: **E09B0067P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Ztráty v konstrukčních částech transformátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište princip a funkci transformátoru.
 2. Charakterizujte ztráty v transformátoru.
 3. Změřte ztráty v nádobě transformátoru.
 4. Nakreslete uspořádání ve 3D softwaru.
-

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

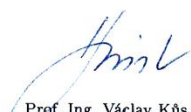
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Bouzek**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Následující text představuje bakalářskou práci na téma ztrát v konstrukčních částech transformátoru, konkrétně v nádobě. První část obsahuje teoretické informace o transformátorech a jejich širokém spektru využití. Následující kapitola přibližuje měřený transformátor pomocí 3D modelu. Kapitola obsahuje i 3D návrh, postup výroby a dokumentaci nádoby, ve které byl transformátor měřen. Další kapitola se zaměřuje na elektrické ztráty, které v průběhu provozu v transformátoru vznikají. V této kapitole jsou také stanoveny metody měření ztrát, očekávané výsledky, předpokládaný průběh měření a je zde diskutována volba měření v přesyceném stavu. Následující kapitola pojednává o samotném měření ztrát v nádobě transformátoru a výpočtu rozhodujících výsledků pro určení ztrát v nádobě oproti transformátoru naprázdno umístěném mimo nádobu. Na předposledním místě je provedeno srovnání jednotlivých měření, tedy měření ztrát transformátoru ve stavu naprázdno bez nádoby a poté za stejného stavu v nádobě. Závěrem je diskutován výsledek měření a zamyšlení nad průběhem celé práce.

Abstract

Following thesis represents bachelor's thesis focused on losses in construction parts of transformer, specifically in the container. First part contains theoretical information about transformers and their wide use. Next chapter shows details of the transformer by a 3D model and characteristics shown in label values. This chapter contains 3D project, production steps and documentation of the container in which was the transformer measured. Following chapter is focused on electrical losses that are noticed during the measurement. Methods of measuring, expected results, course of measuring and choice of oversaturated state of transformer is also discussed in this chapter. Next-to-last chapter deals with the measurement of losses in the container and calculation of final results of the measurement for determination of differences between measurements of the transformer placed in the container and also outside of the container. In the end of this thesis is made a comparison between single measurements – losses of transformer in no-load state without the container and also in the same state with the container.

Klíčová slova

Ztráty, konstrukční části transformátoru, 3D model, šítkové hodnoty, výroba nádoby, metody měření, přesycený stav, stav naprázdno

Keywords

Electrical losses, construction parts of transformer, 3D model, label values, production of the container, oversaturated state, no-load state

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Ztráty v konstrukčních částech transformátoru vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Lukáše Bouzka. Při tvorbě jsem používal odbornou literaturu uvedenou v seznamu.

Dále také prohlašuji, že veškerý software, který byl použit k vypracování této bakalářské práce, je legální.

.....
Václav Mužík

4. června 2012

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Lukáši Bouzkovi za ochotnou a nadšenou pomoc při vytváření této práce, jeho volný čas věnovaný konzultacím a rady pro tvorbu tohoto dokumentu.

Dále děkuji Ladislavu Soukupovi za jeho pomoc při konstrukci nádoby transformátoru. Také bych chtěl poděkovat rodině, přátelům a blízkým za jejich podporu při studiu.

Obsah

1 Úvod	9
1.1 Členění práce	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
Seznam symbolů.....	12
2 Transformátor	14
2.1 Historie.....	14
2.2 Druhy transformátorů.....	15
2.2.1 Podle počtu fází	15
2.2.2 Podle provedení magnetického obvodu	16
2.2.3 Podle způsobu chlazení	17
2.3 Princip činnosti transformátoru	17
2.3.1 Vyjádření pomocí rovnic.....	18
2.4 Náhradní schéma	20
2.5 Chod naprázdno	21
2.6 Chod nakrátko	21
2.7 Štítkové hodnoty	22
3 3D uspořádání	23
3.1 3D technologie – historie a přínosy.....	23
3.2 3D prostředí	23
3.3 3D model transformátoru	24
3.4 Dokumentace transformátoru	24
3.5 3D model nádoby transformátoru	25
3.6 Postup výroby nádoby transformátoru	26
4 Ztráty	28
4.1 Účinnost.....	28
4.2 Ztráty v železe	28
4.3 Joulovy ztráty ve vinutí	29
4.4 Přídavné ztráty v konstrukčních částech.....	29
4.5 Metoda měření ztrát.....	30
4.5.1 Měření Joulových ztrát	30

4.5.2	Měření ztrát v železe	30
4.5.3	Měření ztrát v konstrukčních částech transformátoru.....	30
4.6	Očekávaný průběh a výsledky	31
4.7	Volba přesyceného stavu.....	31
5	Měření ztrát	32
5.1	Schéma zapojení	32
5.2	Postup měření	32
5.3	Štítek transformátoru	33
5.4	Použité přístroje	33
6	Výstupy měření a výpočtů	34
6.1	Naměřené hodnoty v nádobě transformátoru	34
6.2	Naměřené hodnoty mimo nádobu transformátoru	35
6.3	Rozdílové hodnoty měření uvnitř a vně nádoby	36
6.4	Příklady dopočtených hodnot.....	36
6.5	Grafické znázornění.....	38
7	Závěr	40
7.1	Vyhodnocení postupu	40
7.2	Vyhodnocení měření.....	40
7.3	Vyhodnocení ztrát.....	41
7.4	Další možné pokračování a možný přínos	41
	Seznam použitých zdrojů	42
	Seznam příloh	43
	Příloha A – Dno nádoby	44
	Příloha B – Pevný bok nádoby	45
	Příloha C – Posuvný bok nádoby	46
	Příloha D – Víko nádoby	47
	Příloha E – Nádoba	48
	Příloha F – Výsledná nádoba a měřený transformátor	49

Kapitola 1

Úvod

Již od pravěku byl blesk projevem ohromné síly a byl vnímán jako nadpřirozený jev. V průběhu několika tisíc let bylo toto tajemství odhalováno a odstupováno od mystického původu. Člověk však po celou dobu toužil tento fenomén zkrotit a využít pro svoje potřeby. První krůček nastal na začátku 19. století objevením Voltova článku a od té doby lidstvo urazilo obrovský kus cesty. Elektrotechnika představuje v dnešní době jednu z nejsofistikovanějších exaktních věd, na které stojí i padá dnešní moderní svět. Od akvaristického čerpadla až po ohromné přenosové soustavy vše spadá do této vědy.

Jelikož patřím mezi obdivovatele vědy a techniky a mám potřebu vysvětlit nebo dokázat fyzikální jevy kolem mě, volba studia na elektrotechnické fakultě pro mě byla naprostou samozřejmostí. Od malička jsem se tímto oborem zabýval a jsem rád, že studuji něco, co mě baví a o čem přemýšlím i ve svém volném čase.

Jako téma mé bakalářské práce jsem si vybral problematiku ztrát v konstrukčních částech transformátoru, přesněji v nádobě transformátoru. Cílem této bakalářské práce je dokázat měření, že ztráty v nádobě existují a že je opravdu rozdíl, zda transformátor umístíme do nějaké kovové bedny či ho necháme pracovat bez nádoby.

1.1 Členění práce

Na následujících 40 stranách se snažím čtenáři postupně popsat problematiku ztrát transformátoru, ale také transformátor jako takový v jednotlivých tematických kapitolách.

Nejdříve se dotýkám jeho historie, principu chodu, ale zmiňuji také matematické vyjádření či různé druhy transformátorů. Na konci této části také uvádím způsob provozu.

S ohledem na dnešní dobu prezentuji v další části 3D uspořádání transformátoru a také nádoby, která ho obklopuje. Popisuji zde stručnou historii a funkci 3D modelování, ale zaměřuji se především na to, jak byla nádoba vyrobena. Také uvádím dokumentaci nádoby a transformátoru.

Dále zachycuji problematiku ztrát, které se v průběhu provozu tohoto elektrického stroje projevují. Popisuji zde jednotlivé druhy ztrát, způsob jejich měření a také detailně rozebírám, jakým způsobem měřím ztráty předloženého transformátoru.

„Měření ztrát“ – tak se nazývá další kapitola, ve které krok po kroku popisují měření ztrát v nádobě předloženého transformátoru.

Poslední dvě kapitoly pak pojednávají o tom, jakých výsledků jsem v průběhu měření dosáhl a zda se ztráty projeví a jsou měřitelné. Hodnotím zde také přínos těchto informací a možnou cestu, kde by se dalo v pozdějších letech studia pokračovat.

Na konec bakalářské práce jsem připojil několik příloh, které zahrnují detailní dokumentaci nádoby transformátoru.

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 - Provedení magnetického obvodu transformátoru	16
Obrázek 2.2 - Model jednofázového transformátoru	17
Obrázek 2.3 - Jednofázový transformátor bez zátěže	18
Obrázek 2.4 - Jednofázový transformátor se zátěží	18
Obrázek 2.5 - Náhradní schéma transformátoru	20
Obrázek 3.1 - 3D model transformátoru	24
Obrázek 3.2 - Dokumentace transformátoru se základními rozměry	24
Obrázek 3.3 - 3D model nádoby transformátoru	25
Obrázek 3.4 - Broušení svárů	26
Obrázek 3.5 - Vrtání děr pro upevnění bočnic	27
Obrázek 3.6 - Upevnění dna a boku nádoby	27
Obrázek 3.7 - Připevnění bočnic nádoby	27
Obrázek 3.8 - Připevnění zadní části nádoby	27
Obrázek 3.9 - Kompletace nádoby	27
Obrázek 5.1 - Schéma zapojení měřícího obvodu	32
Obrázek 6.1 - Závislost činného výkonu na napětí	38
Obrázek 6.2 - Křivka ztrát v nádobě	38
Obrázek 6.3 - Závislost účinníku na napětí	39

Seznam tabulek

Tabulka 6.1 – Naměřené hodnoty při umístění transformátoru uvnitř nádoby	34
Tabulka 6.2 – Naměřené hodnoty při umístění transformátoru mimo nádobu.....	35
Tabulka 6.3 – Tabulka výsledných ztrát.....	36

Seznam symbolů

Značka	Jednotka	Význam
I	[A]	Proud
U	[V]	Napětí
U _i	[V]	Indukované napětí
Φ	[Wb]	Magnetický indukční tok
X	[Ω]	Reaktance
N	[-]	Počet závitů
Ψ	[Wb]	Spřažený tok
T	[s]	Čas
ω	[rad s ⁻¹]	Úhlová rychlost
f	[Hz]	Kmitočet
u _k	[%]	Napětí nakrátko
i ₀	[%]	Proud naprázdno
R	[Ω]	Odpor
Z	[Ω]	Impedance
k	[-]	Převod
P	[W]	Činný výkon
Q	[Var]	Jalový výkon
S	[VA]	Zdánlivý výkon
ΔP _k	[W]	Ztráty nakrátko
ΔP ₀	[W]	Ztráty naprázdno
ΔP _j	[W]	Ztráty Joulovy
ΔP _d	[W]	Ztráty přídavné
ΔP _{Fe}	[W]	Ztráty v železe
ΔP _{Feh}	[W]	Ztráty hysterezní
ΔP _{Fev}	[W]	Ztráty vířivými proudy
η	[-]	Účinnost
m	[-]	Počet fází
CAD	[-]	Computer Aided Design

Kapitola 2

Transformátor

Transformátor je stroj, který je schopen měnit formy elektrické energie. Přesněji měnit hodnoty napětí a proudu vstupní části oproti části výstupní. Tento převod dokážeme měnit a řídit tím parametry elektrické energie. Transformátory jsou jednou z nejdůležitějších částí elektrizační soustavy a díky nim můžeme přenášet elektrickou energii na velké vzdálenost při vysokých napětích a poté jí při nižší napěťové hladině distribuovat do průmyslových objektů, domácností a mnoho dalších objektů. Volba vysokého napětí pro přenos je z důvodu snížení Joulových ztrát, o kterých bude zmíněno mnoho v následujících kapitolách. Výhodou použití transformátoru je široké spektrum využití. Dokážeme je aplikovat mimo vysokonapěťové hladiny i v elektronice, kde se pohybujeme s napětími okolo několika μV . Dokážou pracovat ve frekvenčně velmi širokém rozsahu od téměř stejnosměrného průběhu až do stovek MHz. Jejich jmenovité výkony se pohybují od mVA až do několika set MVA. Dále je dělíme na dvouvinuťové, vícevinuťové, popřípadě jedno nebo vícefázové (nejčastěji třífázové).

2.1 Historie

Historie transformátoru sahá až roku 1831, kdy vědec Michael Faraday objevil elektromagnetickou indukci. Jeho teorii nezávisle na něm potvrdil ve stejném roce Joseph Henry. Objev principu elektromagnetické indukce umožnil pozdější vývoj transformátoru. Prvním druhem transformátoru byl indukční kotouč vynalezen Nicholasem Callanem v roce 1836. Byl prvním, kdo v praxi ukázal vztah mezi primární a sekundární stranou. Indukční kotouče byly připojovány na baterie, tedy stejnosměrný průběh napětí a proudu.

Na začátku experimentů zařízení nefungovalo právě proto, že byl používán stejnosměrný zdroj. Tento problém byl vyřešen náhodou, když se odpojoval jeden z kontaktů od indukčního kotouče. V tu chvíli se stalo napětí alespoň na okamžik časově proměnné a na druhém vinutí se objevilo rozdílné napětí. Později se používaly vibrační kontakty a to právě proto, aby se docílilo časově proměnné povahy napětí zdroje.

V roce 1870 byl poprvé uveden do chodu alternátor. Díky tomuto zařízení se rozběhl vývoj transformátorů naplno a během třiceti let dosáhl vývoj podoby, kterou známe dnes. Od začátku 20. století se již konstrukce a provedení transformátoru příliš neměnila. V dnešní době se klade především důraz na použité materiály a díky jejich vlastnostem se snažíme

transformátory dělat co nejmenší s ohledem na jejich cenu, ekologičnost a hlavně efektivitu.
[4]

2.2 Druhy transformátorů

V následujících subkapitolách uvedu klasické rozdělení transformátorů podle jejich konstrukce, využití nebo způsobu chlazení.

2.2.1 Podle počtu fází

Jedním ze základních dělení transformátorů je podle počtu fází. Nejobvykleji je dělíme na:

- jednofázové
- třífázové

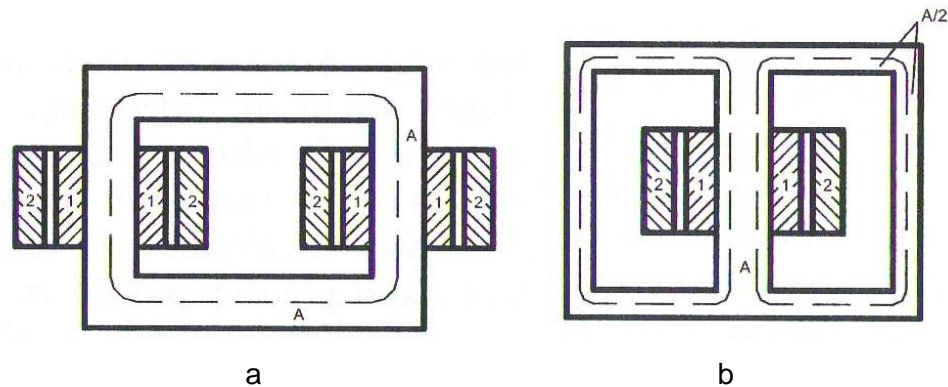
Jednofázové transformátory obvykle používáme na malé výkony do několika stovek wattů. Ve většině případů jsou používány jako snižovací transformátory, tedy transformují směrem dolů, na nižší napětí.

Oproti jednofázovým používáme třífázové transformátory především pro přenos a distribuci elektrické energie (výkony se pohybují ve stovkách megawattů). Zprvu se využívala kombinace tří jednofázových transformátorů, ovšem toto řešení se zdálo být poněkud nevhodné z hlediska rozměrů a nákladů na pořízení a proto byl vyvinut třífázový transformátor. Jeho primární i sekundární vinutí lze zapojit třemi způsoby – hvězda Y(y), trojúhelník D(d), lomená hvězda Z(z), kde velká písmena označují zapojení primární strany a malá strany sekundární. Dále u nich zavádíme takzvané hodinové číslo. Je to vzájemné fázové natočení fázorů primárního a sekundárního napětí stejnojmenných fází. [1] Určuje se ve směru vyššího napětí k nižšímu a je vyjádřeno počtem násobků 30° . Hodinové číslo je udáváno společně s údajem zapojení svorek transformátoru, tedy například Yd1 či Yy6.

2.2.2 Podle provedení magnetického obvodu

Z hlediska provedení magnetického obvodu jsou transformátory děleny na:

- jádrové
- plášťové



Obrázek 2.1 - Provedení magnetického obvodu transformátoru

Na obrázku 2.1 jsou patrna dvě základní provedení transformátorů – jádrové (a) a plášťové (b), kde „A“ je průřez jádra transformátoru. [1]

Jádrový transformátor je stavěn tak, že jeho primární a sekundární vinutí je rozdělené na dvě separátní jádra. Vinutí nižšího napětí je přitom umístěno blíže k jádru. Jádra jsou pak spojena mezi sebou spojkami. U plášťového transformátoru je veden celý hlavní magnetický indukční tok tímto jedním jádrem.

Plášťové transformátory jsou uspořádány tak, že vinutí je usmířeno na středovém sloupku, kterým je vede celý hlavní magnetický indukční tok. Ten se poté rozdělí a uzavírá se krajními jádry. Na těchto jádrech není umístěno žádné vinutí. Spojky mohou mít oproti jádrovému transformátoru poloviční průřez, což je významným faktem u třífázových transformátorů. Díky tomu má i plášťový mnohem menší rozptylové magnetické toky. U plášťového transformátoru kolísá napětí na sekundáru mnohem méně než u jádrového a proto je tvrdším zdrojem napětí.

2.2.3 Podle způsobu chlazení

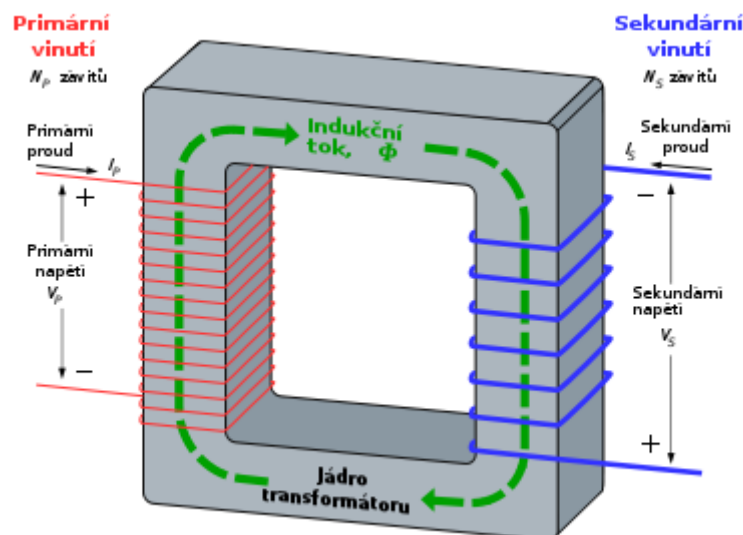
Posledním způsobem dělení transformátorů je podle způsobu chlazení:

- vzduchem chlazené
- s olejovým chlazením

V transformátorech se vzduchovým chlazením se teplo tvořené ztrátami odvádí z povrchu magnetického obvodu a vinutí vedením a především sáláním. Tyto transformátory nazýváme jako suché a jsou to většinou transformátory s menšími výkony. Jsou zpravidla bezúdržbové.

Pro větší výkony, kde je teplo tvořené ztrátami mnohem znatelnější bylo vyvinuto chlazení olejové. Olej jakožto chladící médium slouží i jako konzervační činidlo – izoluje a mechanicky chrání. Teplo je do něj odváděno od vinutí směrem k nádobě, kde je poté vyzařeno do okolí. Někdy z důvodu dosažení větší vyzařovací plochy instalováno žebrování. Oběh oleje může být samovolný nebo i nucený. Oproti suchým transformátorům je u olejových transformátorů třeba dbát na dobrou kvalitu oleje a to zejména na elektrickou pevnost. V neposlední řadě je třeba brát na vědomí i možný ekologický dopad při možné havárii a úniku velkého množství oleje do okolí.

2.3 Princip činnosti transformátoru

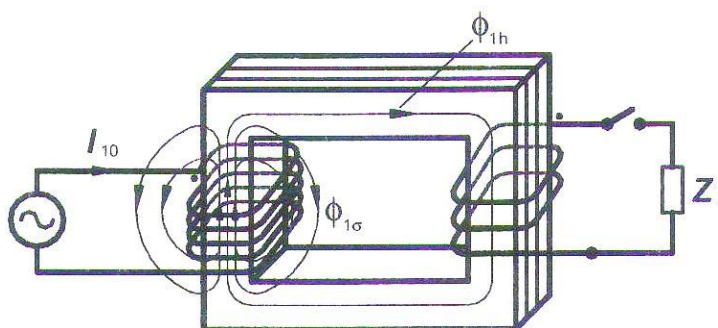


Obrázek 2.2 - Model jednofázového transformátoru

Princip činnosti transformátoru je vždy stejný. [1] Základem je uzavřené feromagnetické jádro, které vede magnetický indukční tok. Tím je zajištěna magnetická vazba mezi primárním a sekundárním vinutím.

Samotná transformace probíhá tak, že proud v primárním vinutí vybudí střídavý magnetický indukční tok, který zabírá s vinutím sekundárním a budí v něm střídavé napětí. Obě vinutí jsou zpravidla umístěna na jednom jádře tak, aby měla společnou osu. Tímto je zajištěna nejlepší možná magnetická vazba. Ve většině případů je napěťová hladina primární části vyšší než sekundární.

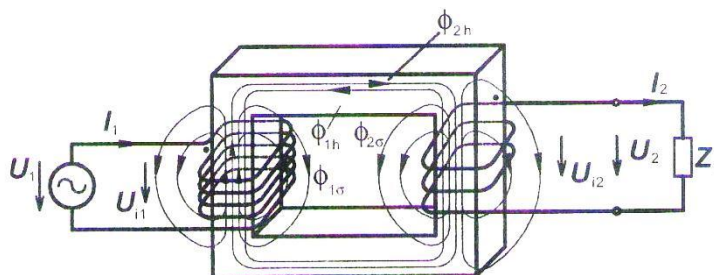
2.3.1 Vyjádření pomocí rovnic



Obrázek 2.3 - Jednofázový transformátor bez zátěže

Tok ϕ_1 je složen z hlavního toku ϕ_{1h} a rozptylového toku $\phi_{1\sigma}$. Hlavní tok ϕ_{1h} se uzavírá feromagnetickým jádrem a budí tak napětí na sekundárním vinutí. Rozptylový tok $\phi_{1\sigma}$ se pak uzavírá jen kolem vinutí primárního vinutí a na přenosu energie „primární strana → sekundární strana“ se nepodílí.

$$\phi_1(t) = \phi_{1h}(t) + \phi_{1\sigma}(t) \quad (2.3.1-1)$$



Obrázek 2.4 – Jednofázový transformátor se zátěží

Při zapojení zátěže na stranu sekundárního vinutí, začne protékat touto stranou proud, který vyvolá magnetický indukční tok ϕ_2 . Tedy platí

$$\phi_{2(t)} = \phi_{2h(t)} + \phi_{2\sigma(t)} \quad (2.3.1-2)$$

Složky $\phi_{1h(t)}$ a $\phi_{2h(t)}$ se uzavírají na stejné dráze feromagnetického jádra a tvoří tak výsledný tok $\phi_{h(t)}$. Z toho plyne rovnice

$$\phi_{h(t)} = \phi_{1h(t)} + \phi_{2h(t)} \quad (2.3.1-3)$$

Tento výsledný tok $\phi_{h(t)}$ indukuje na vinutích vnitřní napětí

$$u_{i1} = N_1 \frac{d\phi_{h1(t)}}{dt} = \frac{d\psi_{1(t)}}{dt} \quad (2.3.1-4)$$

$$u_{i2} = N_2 \frac{d\phi_{h2(t)}}{dt} = \frac{d\psi_{2(t)}}{dt} \quad (2.3.1-5)$$

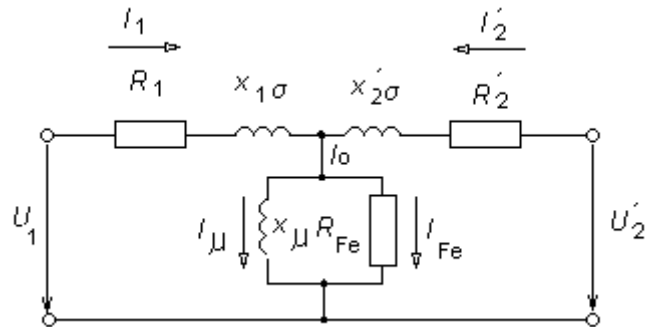
Při harmonickém časovém průběhu toků platí vzorec

$$u_i = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d}{dt}(N\phi \sin \omega t) = N\phi_m \omega \cos \omega t \quad (2.3.1-6)$$

Efektivní hodnota indukovaného napětí je pak

$$U_{i_{ef}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N\phi = 4,44fN\phi \quad (2.3.1-7)$$

2.4 Náhradní schéma



Obrázek 2.5 – Náhradní schéma transformátoru

Náhradní schéma transformátoru je kombinace pasivních prvků (odporů a indukčností), která svými vlastnostmi za určitých předpokladů vyjadřuje elektrické vlastnosti transformátoru. Náhradní schéma je platné pro harmonické průběhy napětí a proudu.

Pomocí vztahů vycházejících z Kirchohoffových zákonů jsme schopni vlastnosti náhradního schématu popsat algebraicky a dovozovat z nich především hodnoty proudů v transformátoru. Z naměřených charakteristiky naprázdno a nakrátko a znalostí náhradního schématu lze také zjistit další parametry – reaktance a odpory primárního a sekundárního vinutí. Veličiny označené apostrofem jsou převedeny na stranu primární (schéma platí pro transformátory s převodem 1). Mezi skutečnými a převedenými veličinami platí následující vztahy:

$$U'_2 = kU_2 \quad I'_2 = \frac{1}{K}I_2 \quad Z'_2 = k^2Z_2 \quad (2.4-1)$$

Napěťové rovnice pro náhradní schéma jsou pak:

$$U_1 = R_1I_1 + jX_{1\sigma}I_1 = R_1I_1 + jX_{1\sigma}I_1 + jX_\mu(I_1 + I'_2) \quad (2.4-2)$$

$$U'_2 = R'_2I'_2 + jX'_{2\sigma}I'_2 + U_i = R'_2I'_2 + X'_{2\sigma}I'_2 + jX_\mu(I_1 + I'_2) \quad (2.4-3)$$

po úpravě

$$U_1 = (R_1 + jX_1)I_1 + jX_\mu I'_2 \quad (2.4-4)$$

$$U'_2 = jX_\mu I_1 + (R'_2 + jX'_2)I'_2 \quad (2.4-5)$$

kde celkové reaktance primární a sekundární části jsou

$$X_1 = X_{1\sigma} + X_\mu \quad (2.4-6)$$

$$X'_2 = X'_{2\sigma} + X_\mu \quad (2.4-7)$$

2.5 Chod naprázdno

Při chodu transformátoru naprázdno jsou svorky sekundárního vinutí rozpojeny a tedy $I_2=0A$, $U_2=U_{20}$. Veškerý výkon, který je dodán ze sítě do transformátoru se při tomto zapojení se spotřebovává na krytí ztrát v železe, které v tomto režimu chodu převažují.

$$P_0 = \Delta P_0 = \Delta P_{1j0} + \Delta P_{Fe} \quad (2.5-1)$$

Při chodu naprázdno je velmi sledovanou veličinou proud naprázdno, který je obvykle poměrnou hodnotou nominálního proudu a proudu protékajícího transformátorem naprázdno. Obecně chceme, aby tato hodnota byla co nejmenší (obvykle 1-10%). Je často uváděna na štítku transformátoru.

2.6 Chod nakrátko

Při tomto režimu chodu jsou svorky spojeny dokrátko, tedy $U_2=0$. Pokud v tomto stavu prochází transformátorem jmenovitý proud I_n , nazýváme napětí na svorkách primárního vinutí napětím nakrátko – U_{kn} . Většinou uvádíme jeho poměrnou hodnotu a je vždy uvedeno na štítku transformátoru.

$$u_k = \frac{U_{kn}}{U_n} \quad (2.6-1)$$

Hodnota η se pohybuje v rozmezí 4-12% u transformátorů o velkých výkonech. Dosahuje hodnoty 30% u transformátorů pro výkonovou elektroniku a bývá často měřítkem tvrdosti zdroje. Toto specifikum transformátoru volíme tedy v závislosti na předpokládané zátěži a pracovní režim transformátoru.

Výkon se v tomto režimu spotřebuje na krytí Joulových ztrát ve vinutích primáru i sekundáru a ztrát přídavných. V tomto režimu je magnetický obvod nenasyčený, jelikož proudy jednotlivých vinutí jsou v protifázi.[2]

2.7 Štítkové hodnoty

Každý transformátor je opatřen takzvaným štítkem, který vyjadřuje hodnoty jeho vypovídajících veličin. Bývá umístěn na viditelném místě a je vyroben z kusu plechu, do kterého jsou hodnoty vyraženy. Obvykle se udává:

- zdánlivý výkon S [VA, kVA, MVA]
- jmenovité hodnoty napětí primáru a sekundáru U_1 a U_2 [V, kV]
- napětí nakrátko u_k [%]
- proud naprázdno i_0 [%]
- hodnoty jmenovitých proudů primáru a sekundáru I_1 a I_2 [A, kA]
- frekvence [Hz]

Kapitola 3

3D uspořádání

Současná doba je ve znamení stále velkého technologického růstu a s tím spjatým nedostatkem času. Především kvůli obrovské konkurenci na poli výrobních gigantů je zapotřebí vyvinutý model operativně pozměňovat a dovytvářet pro různé spektrum zákazníků. Variabilitu výrobku a také jeho dokumentace umožňuje právě využití moderních 3D CAD systémů, který rychlý vstup do návrhu umožňují. V jednom z nich jsem modeloval nejen transformátor samotný, ale také jeho nádobu.

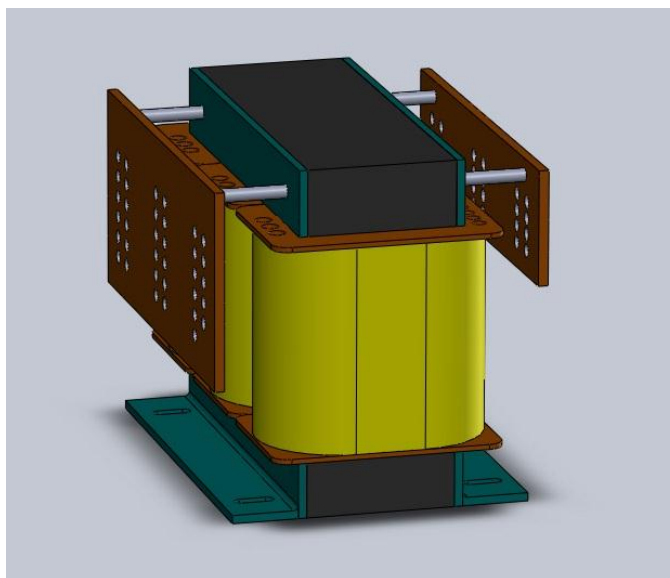
3.1 3D technologie – historie a přínosy

Možnost využití potenciálu moderních informačních technologií přinesla především v letech 1960-1990 značný přínos do světa vědy. První CAD systém spatřil světlo světa v první půlce 60. let. V 70. letech předchozího století se zprvu první 2D grafické aplikace využívaly především v osmibitových herních systémech. S potřebným rostoucím výkonem počítačů vznikla v průběhu druhé poloviny sedmdesátých let také možnost tvorby 3D modelů uživatelskými aplikacemi. V této době byly vyvinuty první 3D CAD systémy – 3D computer aided design (počítačem podporované projektování) jako například AutoCAD nebo AllPlan. [5] 3D modelování nezůstalo jen u modelů 3D objektů, ale zvláště v posledních letech se stále více a více objevují simulační 3D prostředí, které dokáží například simulovat a modelovat rozložení elektromagnetického pole kolem indukčností v reálném čase. Implementace CAD systémů ve výrobě přinesla již zmiňovanou flexibilitu, přesnost, unifikaci a jednotu návrhu. Elektronická podoba je mnohem mobilnější a efektivnější než dřívější projekce na papír. Technická dokumentace je díky tomuto objevu perspektivnější a přehlednější obor než dříve.

3.2 3D prostředí

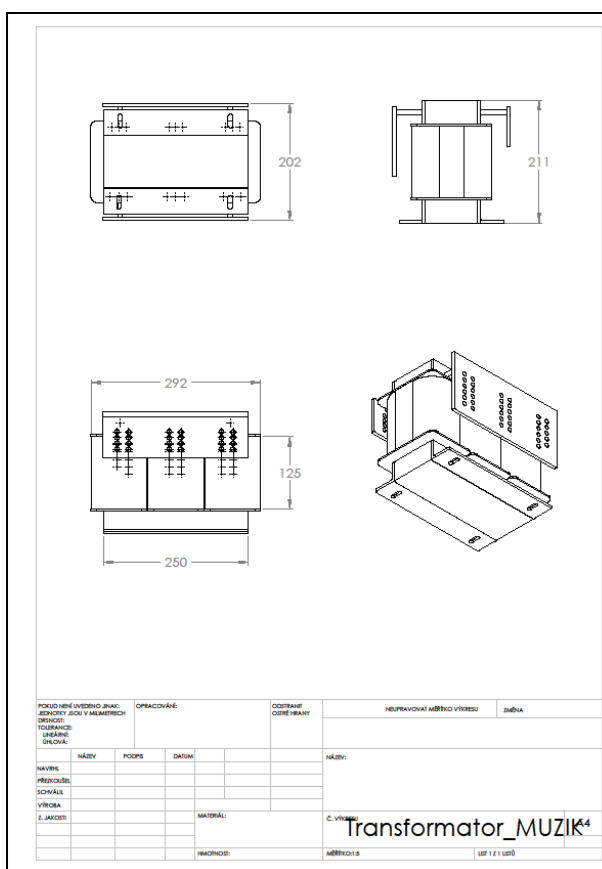
3D prostředí, ve kterém byl vytvořen model měřeného třífázového transformátoru a také nádoba je SolidWorks. Stejně tak jsem používal prostředí SolidWorks i pro dokumentace těchto objektů – výkresy.

3.3 3D model transformátoru



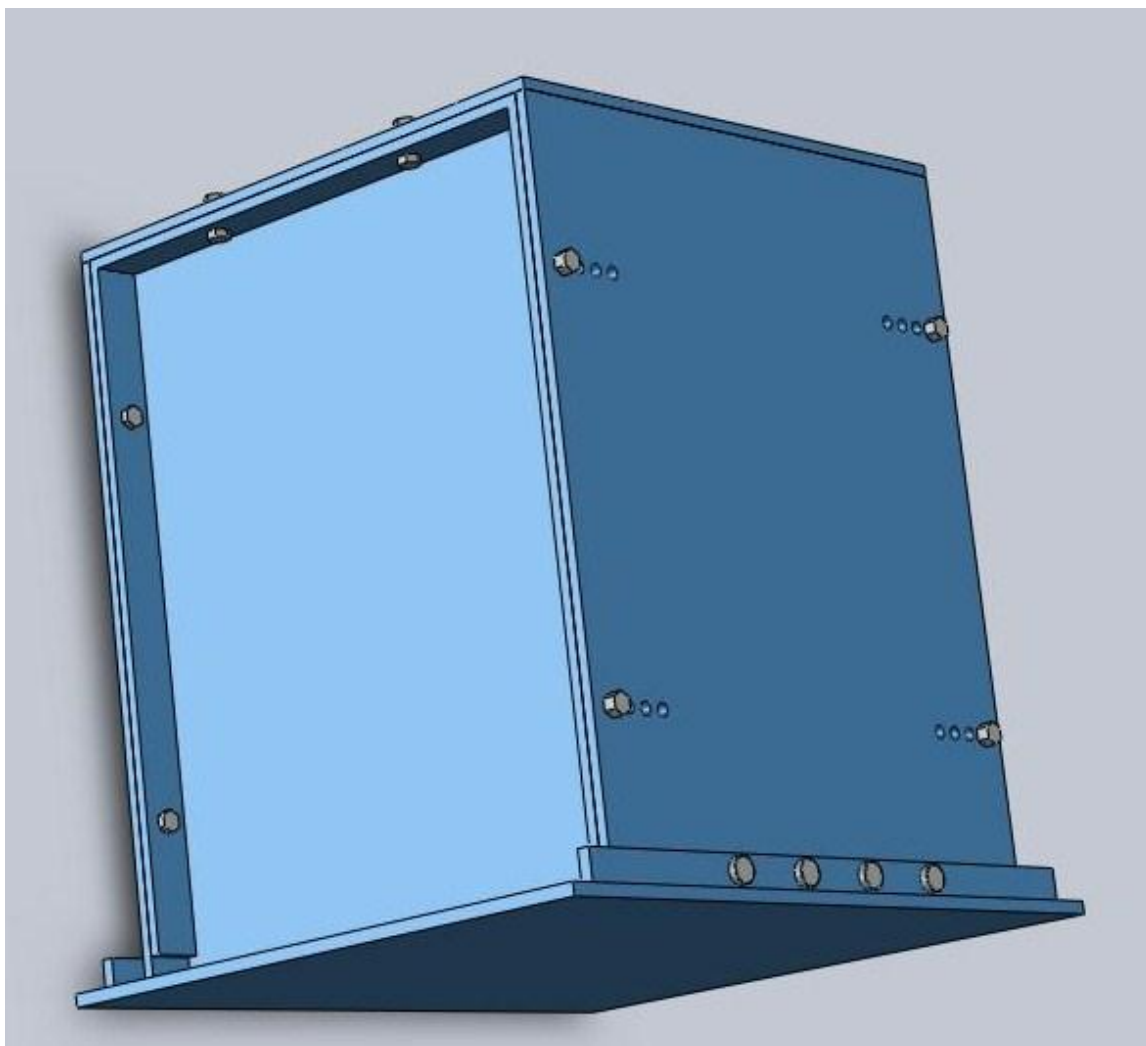
Obrázek 3.1 – 3D model transformátoru

3.4 Dokumentace transformátoru



Obrázek 3.2 – Dokumentace transformátoru se základními rozměry

3.5 3D model nádoby transformátoru



Obrázek 3.3 – 3D model nádoby transformátoru

3.6 Postup výroby nádoby transformátoru



Obrázek 3.4 - Broušení svárů

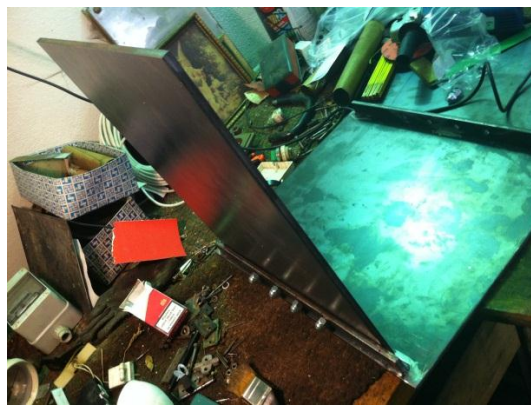
Konstrukce nádoby započala měřením rozměrů dodaných plechů o tloušťce 7mm a 8mm. Pokračovali jsme přibližným návrhem na papíře. Klíčovou vlastností nádoby měla být možnost posunu přední a zadní strany nádoby alespoň o 4 pozice z důvodu využití pro více typů transformátoru a možnosti měření ztrát v nádobě při různých vzdálenostech stěn od transformátoru.

Po dokončení části návrhů jsme obdrželi plechy. Jelikož se jednalo o poměrně manuálně náročnou práci, konstrukci jsme prováděli ve dvou lidech. Zprvu jsme přemýšleli o vytvoření závitů do všech vrtaných otvorů, ale z důvodu dvojího vrtání pro každou díru jsme od tohoto úmyslu odstoupili a použili šrouby s matkami. V podstatě šlo o vyvrtání přibližně 80 děr, které slouží k sestavení celé nádoby. Menší díry pro šrouby jsou průměru 8mm a větší mají průměr 10mm. Všechny díry byly nejdříve předvrtány vrtákem do železa o průměru 4mm. Při vrtání jsme používali vrtačku s nastavitelnými otáčkami, stojan pro vrtání pro uchycení těžkých plechů.

Při vrtání by za sucha docházelo k rapidnímu poškození vrtáků, proto jsme po celou dobu vrtání dbali na mazání a odvod tepla pomocí vrtacího oleje. Při konstruování jsme zaznamenali jediný zádrhel v podobě od výroby špatně zpracovaných svárů, které jsme pomocí kotoučové brusky museli zbrousit. Finální nádoba byla zkonstruována dle předpokladů a hlavní cíl, tedy možnost změny rozměrů, byl splněn.



Obrázek 3.5 – Vrtání děr pro upevnění bočnic



Obrázek 3.6 – Upevnění dna a boku nádoby



Obrázek 3.7 – Připevnění bočnic nádoby



Obrázek 3.8 – Připevnění zadní části nádoby



Obrázek 3.9 – Kompletace nádoby

Kapitola 4

Ztráty

V přechozích kapitolách jsem se zabýval principem činnosti transformátoru a popis dějů pomocí jednoduchých rovnic. Některé z uvedených rovnic jsme schopni aplikovat pouze v případě, že zanedbáváme ztráty, které se v transformátoru tvoří při jeho činnosti. Bohužel i přes stovky let dlouhou snahu o vytvoření „perpetuum mobile“ tento cíl ani u transformátorů nedokážeme dosáhnout. Každý transformátor má, stejně jako každý stroj, svojí účinnost, která bude vždy menší než jedna.

4.1 Účinnost

Pro výpočet účinnosti transformátoru používáme obecně známý vztah

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P_p - \sum \Delta P}{P_p}, \eta < 0,99 \quad (4.1-1)$$

Účinnost roste s výkonem transformátoru

4.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe definujeme vztahem

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fev} + \Delta P_{Feh} \quad (4.2-1)$$

kde ΔP_{Fev} jsou ztráty vířivým proudy $\Delta P_{Fev} \approx B^2 f^2$. Jsou omezeny lištěným provedením jader transformátorů a také přidáním křemíku, který snižuje elektrickou vodivost, do materiálů plechů. [1] V laboratorních či speciálních transformátorech se používají plechy se speciální texturou a polarizací, aby se docílilo co nejmenších možných ztrát. Ztráty hysterezní $\Delta P_{Feh} \approx B^2 f$ se snažíme omezit použitím plechů s úzkou hysterezní smyčkou. Jsou nezávislé na zatížení transformátoru a říká se jim proto ztráty naprázdno. [1]

4.3 Joulovy ztráty ve vinutí

Joulovy ztráty jsou patrné především v chodu nakrátko, kdy pro ně platí

$$\Delta P_{jk} = m(R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) = m \left(R_1 I_1^2 + \frac{R'_2}{k^2} k^2 I_2^2 \right) = m(R_1 + R'_2) I_1^2 \quad (4.3-1)$$

Joulovy ztráty jsou stejně jako všude jinde tvořeny předáváním části kinetické energie částic, které způsobují elektrický proud částicím vodiče kladoucím odpor tomuto proudu. Tím se zvyšuje tepelný pohyb částic vodiče a nastává neblahý dopad – ohřev vinutí. [1]

4.4 Přídavné ztráty v konstrukčních částech

Mezi ztráty přídavné patří ztráty vířivými proudy v konstrukčních částech transformátoru a také ztráty skinefektom. Jako ztráty v nádobě především označujeme ztráty vířivými proudy, které se uzavírají nejen v magnetickém obvodu, kolem vodičů a dalších konstrukčních částech transformátoru samotného, ale především v nádobě, která transformátor obklopuje. Tyto ztráty se uzavírají v rovných plochách plechů a jsou způsobeny rozptylovým magnetickým tokem vyvolaným ve vinutí a přírodních vodičích. Ztráty v konstrukčních částech mohou dosahovat více než 20% z celkových ztrát nakrátko.

Mohou být účinně regulovány správnou volbou a provedením nádoby. Jsou nežádoucí hlavně kvůli jejich tepelnému účinku, který může lokálně vzrůst na vysoké teploty a tím neblaze ovlivnit životnost transformátoru. [8] Toto teplo se pak musí odvádět například nuceným oběhem vzduchu – ventilátorem a tím roste náročnost na údržbu a mimo jiné i cena celého stroje.

Přesný rozbor přídavných ztrát transformátoru se určuje například analytickými metodami vyvíjenými od roku 1980 či novějšími numerickými metodami. V dnešní době se pro přesný rozbor využívá varianta druhá, označována za FEM – Finite Element Method. Využívá se při ní 2-D nebo 3-D modelace zkoumaného objektu.[8]

4.5 Metoda měření ztrát

4.5.1 Měření Joulových ztrát

Joulové ztráty se měří proměřením odporů jednotlivých vinutí a měřením proudu protékajícího daným vinutím. Díky skutečnosti, že odpor se v průběhu měření mění jen minimálně a je tedy konstantní, můžeme dosadit do vztahu

$$\Delta P_{jk} = m(R_1 + R'_2)I_1^2 \quad (4.5.1-1)$$

4.5.2 Měření ztrát v železe

Měření ztrát v železe se provádí obecně ve stavu naprázdno, kdy vinutími protéká naprosto minimální proud a veškerá dodávaná elektrická energie je využita na sycení magnetického obvodu. Měření u třífázového transformátoru probíhá tak, že se například metodou dvou Wattmetrů měří výkon transformátoru, odpor vinutí a proud protékající vinutím primární strany. Odečtením Joulových ztrát (viz výše) od celkových ztrát ΔP naměřených dostáváme ztráty v železe. [3]

4.5.3 Měření ztrát v konstrukčních částech transformátoru

Měření ztrát v konstrukčních částech transformátoru – tedy nádobě je stěžejním tématem této bakalářské práce. Samotné měření probíhá ve stavu naprázdno, protože je třeba docílit co největšího sycení magnetického obvodu, k čemuž například u stavu nakrátko nedochází. Měření je rozděleno na dvě části. Nejprve se měří celkové ztráty transformátoru naprázdno mimo nádobu. Poté se transformátor vloží do nádoby a znovu se proměří se stejným krokem a napětím i uvnitř nádoby. Pro výpočet samotných ztrát v nádobě předpokládáme, že Joulové ztráty ve vinutích jsou po celou dobu, ale hlavně minimální – zanedbatelné a při obou měřeních totožné. Pak jsou ztráty v nádobě transformátoru rozdílem naměřených činných výkonů. Tedy

$$\Delta P_{kč} = \Delta P_{Fe-v\ nádobě} - \Delta P_{Fe-mimo\ nádobu} \quad (4.5.3-1)$$

4.6 Očekávaný průběh a výsledky

Očekáváním je naměřit rozdíl $\Delta P_{k\check{c}}$ uvedený výše kladný a dokázat tím, že ztráty v nádobě nejsou zanedbatelnou složkou transformátorů. Největší rozdíl by měl být zřetelný ke konci měření, kdy se napětí na svorkách primárního vinutí pohybuje u nominální hodnoty. Při tomto napětí dochází k největšímu sycení magnetického obvodu a ztráty v železe jsou maximální. Ztráty v nádobě jsou tvořeny vířivými proudy, které při sycení magnetického obvodu vznikají a uzavírají se nejen magnetickým obvodem, ale také nádobou a tím zvyšují celkové ztráty v železe. U velkých výkonů by bylo kromě naměření rozdílů činných výkonů také patrné oteplení pláště, popř. nádoby transformátoru. Procentuální poměr ztrát v nádobě k činnému výkonu transformátoru mimo nádobu by se měl pohybovat rozmezí

$$\frac{\Delta P_{k\check{c}}}{\Delta P_{Fe-mimo\ n\acute{a}dobu}} \approx 1 - 15\% \quad (4.6-1)$$

4.7 Volba přesyceného stavu

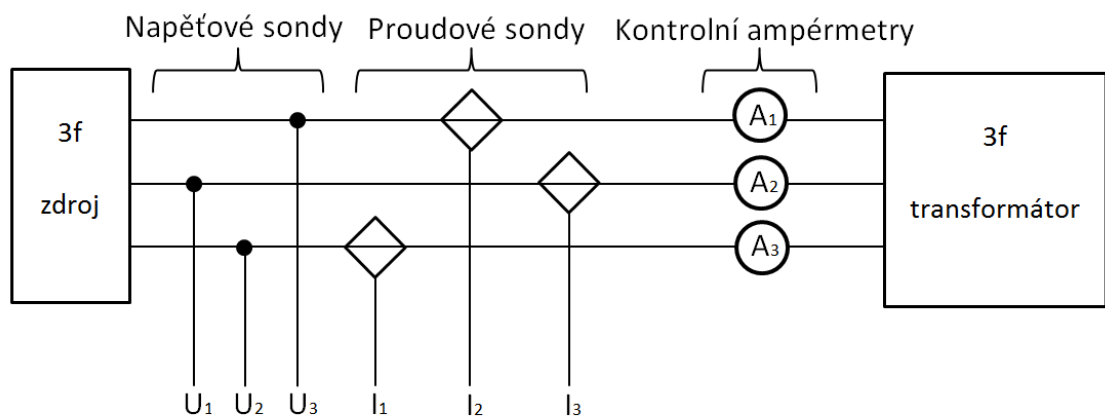
Při testování měřícího obvodu před samotným započítím měření a této bakalářské práce bylo rozhodnuto, že transformátor mírně přebudíme tak, že hodnota napětí se bude pohybovat v rozmezí 130-140% jmenovité hodnoty napětí. Z toho důvodu, aby byly výše zmíněné rozhodující ztráty co největší a magnetický obvod byl přesycený. Tím by měly vznikat i mnohem větší vířivé proudy a celkové ztráty v nádobě by měly být podstatně zřetelnější.

Kapitola 5

Měření ztrát

Aby se jednoznačně dalo určit, zda je teorie ztrát v nádobě správná, je třeba jí podložit měření. I v případě měření ztrát v nádobě bylo třeba sestavit schéma zapojení měřících obvodů, zapojit je a odzkoušet jejich správnost, ale také vykonat samotné srovnávací měření transformátoru umístěného mimo nádobu a umístěného v nádobě. O tom podrobněji pojednává následující kapitola.

5.1 Schéma zapojení



Obrázek 5.1 – Schéma zapojení měřícího obvodu

5.2 Postup měření

Měření jsem započal sestavením obvodu (viz 5.1). Zprvu jsem měřil transformátor ve stavu naprázdno mimo nádobu z důvodu určení ztrát samotného transformátoru. Pomalu jsem zvyšoval napětí s krokem 10V u hodnot 30-80V a poté s krokem 20V u hodnot 80-500V. Při nastavování napětí jsem odečítal hodnoty proudů, účinníku, výkonů činného, jalového i zdánlivého z analyzátoru výkonu. Z důvodu nevyhovujícího rozsahu třífázového analyzátoru výkonu byly v obvodu zapojené ještě kontrolní ampérmetry, pomocí nichž bylo možné dopočítat výkony i pro nižší hodnoty proudu tekoucího transformátorem naprázdno. Účinník byl na analyzátoru patrný po celou dobu měření. Jakmile jsme dokončili první měření, umístil jsem transformátor do nádoby a stejným způsobem měřil i tentokrát. Rozdílem je pouze fakt,

že jsem najížděl s napětím od začátku, tedy 40-400V s krokem 40V a poté až do 500V s krokem 20V. Napětí 500V, které se nachází za štítkovou hodnotou jsem volil z důvodu přesycení a větší patrnosti ztrát v nádobě. Z naměřených hodnot jsem byl schopen dopočítat chybějící údaje u nižších proudů – jalový, činný i zdánlivý výkon. Všechny informace získané v průběhu měření slouží ke stanovení rozdílů ztrát mezi umístěním v nádobě či mimo nádobu transformátoru.

5.3 Štítek transformátoru

Měřený transformátor má níže uvedené štítkové údaje:

- Transformátorek ZSE PRAHA
- ČSN351310, třífázový
- TYP: INC-3 259
- PRIMÁR: 3x380V +/- 5-7 V
- SEKUNDÁR: 3x75-92 V
- ZDÁNLIVÝ VÝKON: 3 kVA
- JMENOVITÝ PROUD: 18,8 A
- FREKVENCE: 50/60 Hz
- Made in Czechoslovakia, V.Č.: 48262/80

5.4 Použité přístroje

K měření jsme používali následující přístroje:

- 1x napájecí booster
- 3x ručičkový Ampérmetr
- 1x třífázový analyzátor výkonu HIOKI 3166 (3x napěťová sonda, 3x proudová sonda)

Kapitola 6

Výstupy měření a výpočtů

Po měření samotném vždy vyvstane otázka, zda jsme potvrdili teorii či nikoliv. To je právě hlavním cílem všech měření – potvrdit teoretické předpoklady. I v případě měření ztrát v konstrukčních částech transformátoru bylo dosaženo mnoha údajů měřících přístrojů, které ovšem jako takové nic o shodě či rozporu s předpokladem nevypovídají. Až úprava a jejich interpretace jako rozdíl nám může povědět více. A právě rozбором naměřených hodnot se zabývá kapitola rozprostírající se níže.

6.1 Naměřené hodnoty v nádobě transformátoru

U1 [V]	U2 [V]	I1 [A]	I3 [A]	I2 [A]	I _{av} [A]	P [W]	Q [VAr]	S [VA]	cos φ	sin φ
40,90	41,00	0,04	0,01	0,04	0,03	0,75	1,89	2,03	0,37	0,93
79,70	79,90	0,05	0,04	0,05	0,05	3,57	5,70	6,73	0,53	0,85
119,70	119,80	0,07	0,05	0,07	0,06	7,58	11,07	13,41	0,57	0,83
159,97	159,83	0,10	0,07	0,10	0,09	12,87	20,59	24,28	0,53	0,85
199,67	199,70	0,13	0,09	0,13	0,11	18,98	34,03	38,97	0,49	0,87
239,85	239,30	0,17	0,12	0,16	0,15	26,59	55,00	61,00	0,44	0,90
280,63	280,20	0,24	0,17	0,23	0,21	34,19	97,00	102,00	0,33	0,94
321,00	320,00	0,33	0,24	0,33	0,30	43,27	160,00	166,00	0,26	0,97
361,00	360,00	0,46	0,34	0,45	0,42	53,98	255,00	259,00	0,21	0,98
401,20	400,10	0,68	0,51	0,66	0,61	67,78	420,00	424,00	0,16	0,99
420,10	419,00	0,84	0,64	0,81	0,76	75,86	548,00	552,00	0,14	0,99
440,18	439,00	1,08	0,84	1,06	0,99	86,10	740,00	749,00	0,11	0,99
460,30	459,00	1,44	1,15	1,42	1,34	95,87	1066,00	1072,00	0,09	1,00
479,59	478,60	1,93	1,56	1,89	1,80	119,18	1500,00	1500,00	0,08	1,00
499,70	497,20	2,55	2,08	2,22	2,28	138,00	2043,00	2065,00	0,07	1,00

Tabulka 6.1 – Naměřené hodnoty při umístění transformátoru uvnitř nádoby

Poznámka: Barevně vyznačené hodnoty jsou dopočtené, jelikož měřící analyzátor sítě je pro některé hodnoty zdánlivého výkonu nedokázal ukázat.

6.2 Naměřené hodnoty mimo nádobu transformátoru

U1 [V]	U2 [V]	I1 [A]	I3 [A]	I2 [A]	Iav [A]	P [W]	Q [VAr]	S [VA]	cos φ	sin φ
32,07	31,86	0,02	0,01	0,02	0,02	0,38	0,84	1,85	0,41	0,91
39,96	40,01	0,03	0,01	0,03	0,02	0,72	1,44	2,89	0,45	0,89
50,08	50,35	0,04	0,02	0,04	0,03	1,40	2,54	3,62	0,48	0,88
68,69	69,96	0,05	0,03	0,05	0,04	2,65	4,25	5,60	0,53	0,85
80,29	80,60	0,06	0,03	0,06	0,05	3,55	5,45	7,90	0,55	0,84
99,73	99,94	0,06	0,04	0,06	0,06	5,44	8,15	11,18	0,56	0,83
120,51	120,70	0,07	0,05	0,07	0,06	7,55	11,20	15,81	0,56	0,83
140,21	140,30	0,09	0,06	0,08	0,08	10,07	15,38	21,05	0,55	0,84
160,21	160,31	0,10	0,07	0,10	0,09	12,80	20,37	27,30	0,53	0,85
179,91	179,91	0,11	0,08	0,11	0,10	15,81	26,25	34,69	0,52	0,86
199,71	199,34	0,13	0,09	0,12	0,11	18,93	33,50	45,50	0,49	0,87
220,81	220,13	0,15	0,10	0,15	0,13	22,22	45,10	50,00	0,44	0,90
243,20	243,18	0,18	0,12	0,17	0,16	26,52	60,00	66,00	0,40	0,92
260,83	260,36	0,20	0,14	0,20	0,18	29,92	75,00	81,00	0,37	0,93
281,20	280,72	0,24	0,17	0,23	0,21	34,09	97,00	103,00	0,33	0,94
300,85	300,40	0,28	0,20	0,27	0,25	38,59	123,00	129,00	0,30	0,95
320,50	320,00	0,33	0,24	0,32	0,29	43,10	157,00	162,00	0,26	0,96
339,20	338,50	0,38	0,28	0,37	0,34	48,10	195,00	200,00	0,24	0,97
359,00	358,20	0,45	0,33	0,44	0,41	53,60	246,00	252,00	0,21	0,98
380,50	379,00	0,55	0,41	0,54	0,50	59,90	320,00	326,00	0,18	0,98
399,50	398,60	0,66	0,50	0,64	0,60	66,73	406,00	411,00	0,16	0,99
420,11	419,00	0,82	0,63	0,80	0,75	74,32	540,00	546,00	0,14	0,99
440,00	439,80	1,10	0,85	1,07	1,01	82,10	760,00	768,00	0,11	0,99
460,00	458,00	1,44	1,16	1,43	1,34	85,31	1075,00	1076,00	0,08	1,00
480,00	479,00	1,98	1,58	1,95	1,84	105,25	1525,00	1518,00	0,07	1,00
500,00	498,60	2,63	2,15	2,60	2,46	123,36	2140,00	2130,00	0,06	1,00

Tabulka 6.2 – Naměřené hodnoty při umístění transformátoru mimo nádobu

Poznámka: Barevně vyznačené hodnoty jsou dopočtené, jelikož měřicí analyzátor sítě je pro některé hodnoty zdánlivého výkonu nedokázal ukázat.

6.3 Rozdílové hodnoty měření uvnitř a vně nádoby

U [V]	P _{bez nádoby} [W]	P _{v nádobě} [W]	ΔP _{nádoba} [W]
40,95	0,72	0,75	0,03
79,80	3,55	3,57	0,02
119,75	7,55	7,58	0,03
159,90	12,80	12,87	0,07
199,69	18,93	18,98	0,05
239,58	26,52	26,59	0,07
280,42	34,09	34,19	0,10
320,50	43,10	43,27	0,17
360,50	53,60	53,98	0,38
400,65	66,73	67,78	1,05
419,55	74,32	75,86	1,54
439,59	82,10	86,10	4,00
459,65	85,31	96,00	10,69
479,10	105,25	119,18	13,93
498,45	123,36	138,00	14,64

Tabulka 6.3 – Tabulka výsledných ztrát

6.4 Příklady dopočtených hodnot

V této subkapitole uvádím vzorové výpočty veličin, které měřicí přístroje nebyly schopny ukázat, ale také veličiny, které jsou zapotřebí pro konstrukci grafů.

Napětí U uvažuji jako průměrnou hodnotu ze dvou Voltmetrů – U_1 a U_2 , tedy

$$U = \frac{U_1 + U_2}{2} = \frac{40,90 + 41,00}{2} = 40,95 \text{ V} \quad (6.4-1)$$

Stejně jako napětí, tak i proud I_{av} počítám jako průměrnou hodnotu fázových proudů, tedy

$$I_{av} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{0,04 + 0,01 + 0,04}{3} = 0,03 \text{ A} \quad (6.4-2)$$

Pro dopočet činného výkonu vycházím ze vzorce

$$P = \sqrt{3} U I_{av} \cos \varphi \quad (6.4-3)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot 40,95 \cdot 0,02866 \cdot 0,37 = 0,75 \text{ W} \quad (6.4-4)$$

Pro dopočet jalového výkonu vycházím ze vzorce

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{av} \cdot \sin \varphi \quad (6.4-5)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot 40,95 \cdot 0,02866 \cdot 0,93 = 1,89 \text{ VA} \quad (6.4-6)$$

Pro výpočet zdánlivého výkonu využívám výkonového trojúhelníku, tedy

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6.4-7)$$

$$S = \sqrt{0,75^2 + 1,87^2} = 2,03 \text{ VA} \quad (6.4-8)$$

Pro výpočet hodnoty $\sin \varphi$ používám matematický vztah

$$(\sin \varphi)^2 + (\cos \varphi)^2 = 1 \rightarrow \sin \varphi = \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \quad (6.4-9)$$

po vyjádření pak aplikuji nově vzniklý vzorec

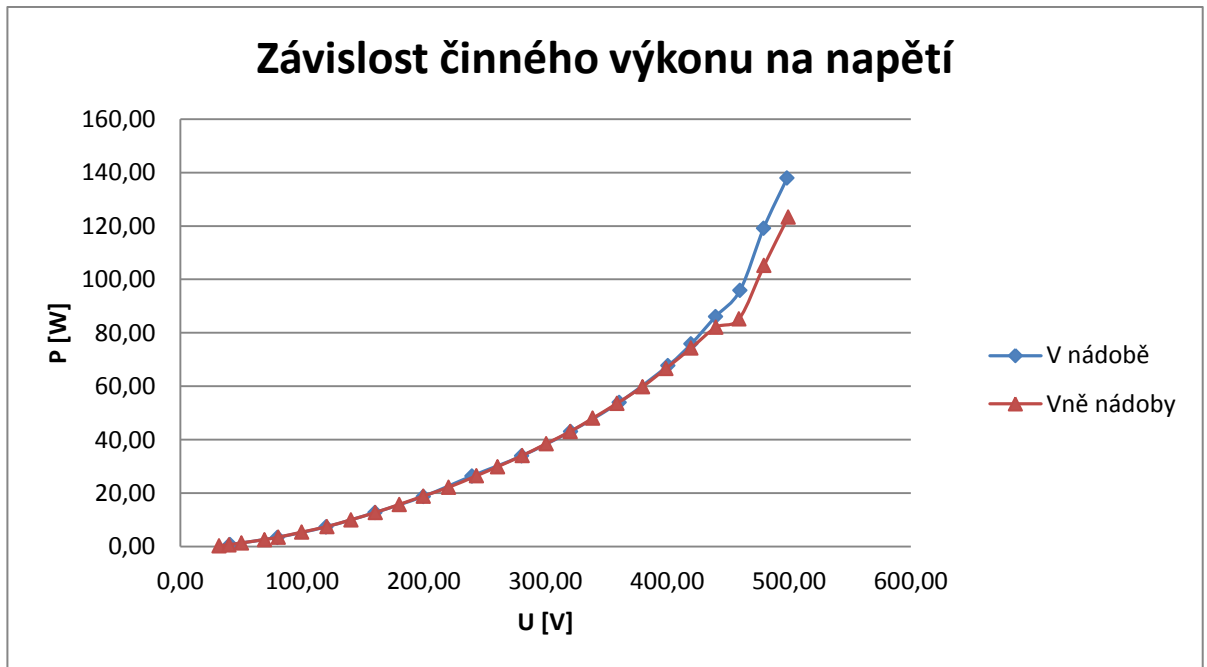
$$\sin \varphi = \sqrt{1 - 0,37^2} = 0,93 \quad (6.4-10)$$

Pro výsledný ztrátový výkon v nádobě jsem uvažoval rovnici

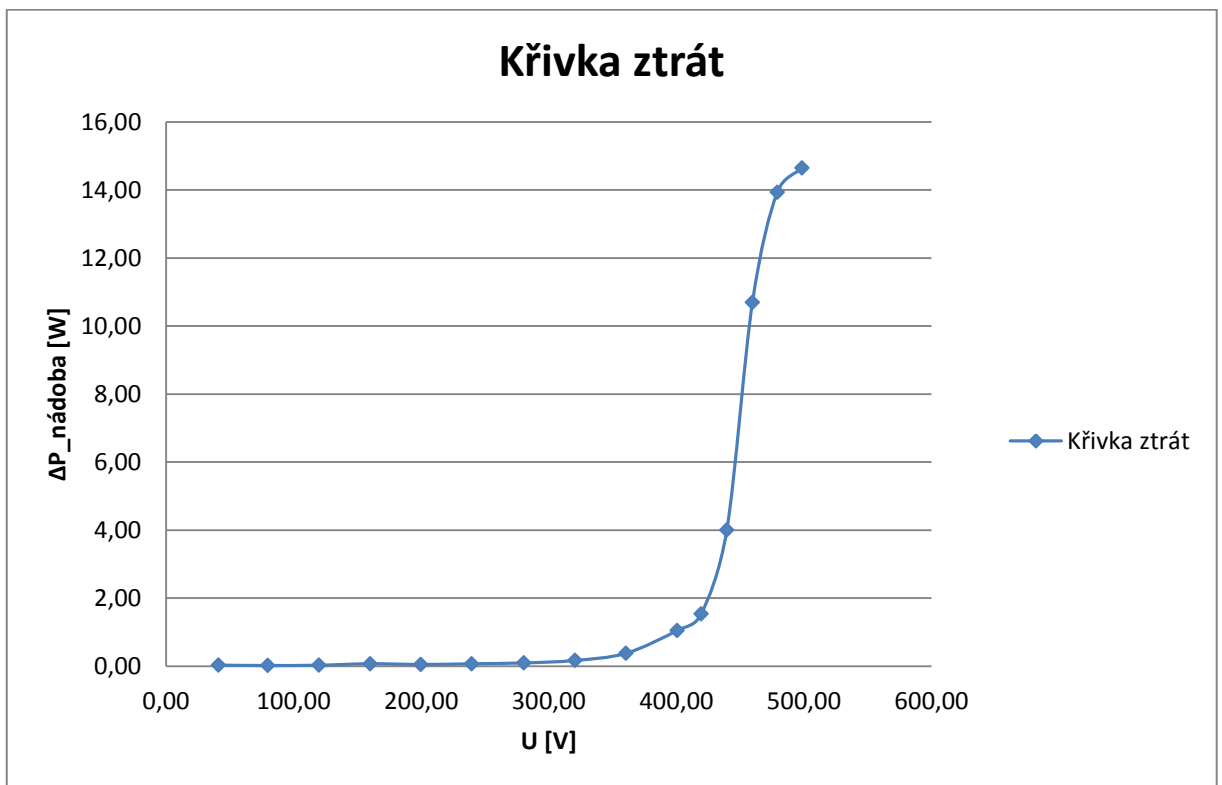
$$\Delta P_{nádobá} = P_{v \text{ nádobě}} - P_{mimo \text{ nádobu}} \quad (6.4-11)$$

$$\Delta P_{nádobá} = 0,75 - 0,72 = 0,03 \text{ W} \quad (6.4-12)$$

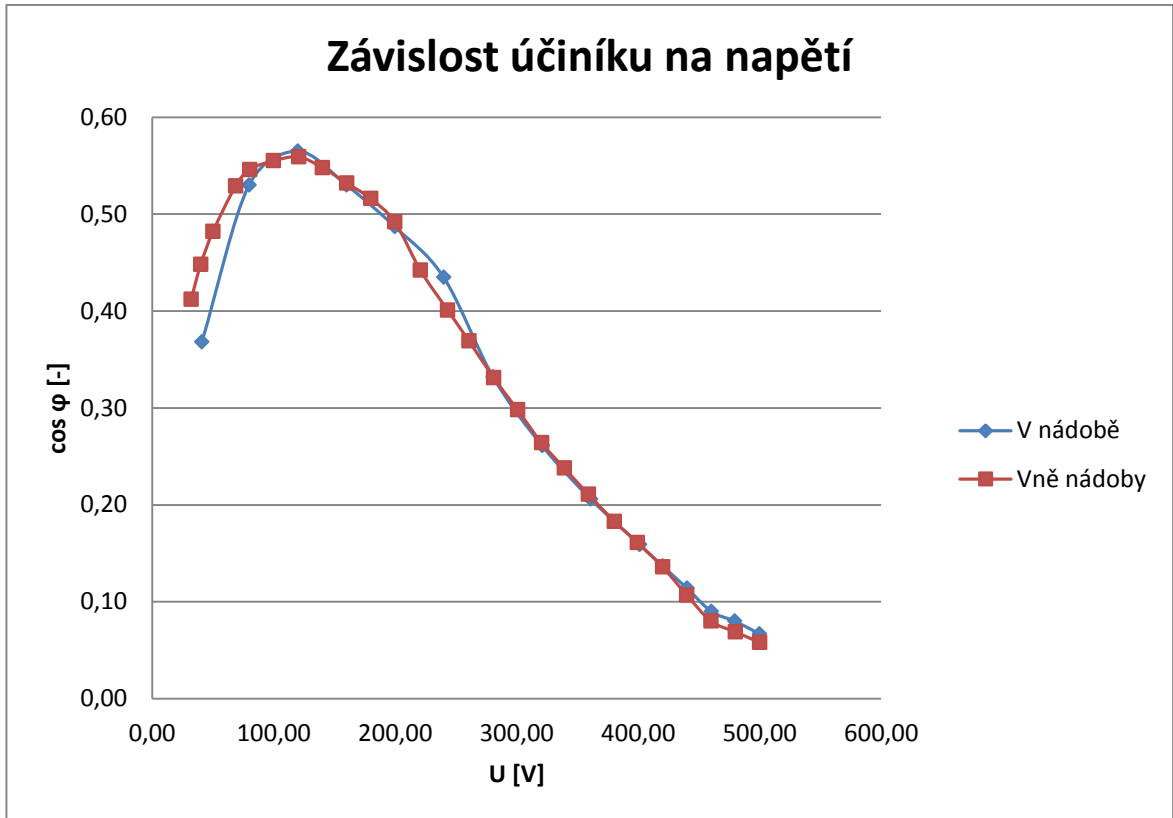
6.5 Grafické znázornění



Obrázek 6.1 – Závislost činného výkonu na napětí



Obrázek 6.2 – Křivka ztrát v nádobě



Obrázek 6.3 – Závislost účinníku na napětí

Pro zhodnocení ztrát v nádobě jsem vytvořil dva grafy. První z nich (6.1) vypovídá o závislosti činného výkonu na zvyšujícím napětí a druhý z nich (6.2) je kýžená závislost ztrát v nádobě transformátoru na zvyšujícím se napětí. Z prvních dvou grafů je na první pohled patrné, že činný výkon i ztráty v průběhu zvyšování napětí rostou. Pro ilustraci jsem pak zařadil i graf (6.3), který je charakteristikou účinníku $\cos \varphi$ v závislosti na velikosti napětí.

Kapitola 7

Závěr

Závěrem této bakalářské práce bych rád zhodnotil, zda se měřeními a úvahami podařilo naplnit očekávání nastolené v teoretické části tohoto dokumentu. Také bych rád nastínil, jakým způsobem by se v této práci mohlo pokračovat dále, aby problematika ztrát v nádobě transformátoru byla obsáhlejší.

7.1 Vyhodnocení postupu

Při zvolené metodě měření ztrát jsem dbal na to, aby bylo dosaženo co největšího rozdílu mezi ztrátovými výkony uvnitř a vně nádoby. A to především z ilustrativních důvodů, aby bylo jasné, zda teorie platí či nikoliv. Bohužel nádobu jsme konstruovali pro transformátor jiných rozměrů a od původního záměru posunu boků jsem musel odstoupit. Měřený transformátor byl menší než původní, a tak jsem nastavil vzdálenost boků co nejbližší. Ani v této pozici však nebyly stěny v plánované vzdálenosti, tedy kolem 1mm, a tak jsem si nebyl jist, zda ztráty v nádobě budou znatelné. Tento rébus jsem vyřešil volbou vyššího napětí než je jeho štítková hodnota a tedy chod v přesyceném stavu.

7.2 Vyhodnocení měření

Při testovacím měření muselo být vyzkoušeno, zda překročení jmenovité hodnoty napětí nádobu, ale hlavně transformátor samotný nějakým způsobem nepoškodí – ať už teplem či rázovým účinkem možné poruchy (selhání izolace – zkrat a tak dále). Jakmile jsem zjistil, že transformátor měření v tomto režimu zvládá, započal jsem měření rozdílu ztrát a zapojil měřicí obvod dle předem navrhnutého schématu (viz 5.1). Přes počáteční potíže s rozměry nádoby se mi podařilo naměřit všechny plánované hodnoty uvnitř i mimo nádobu a i bez zpracování výsledků bylo patrné, že jsou mezi jednotlivými měřeními rozdíly. Měřicí metodu hodnotím jako efektivní, protože jsem v průběhu měření nemusel měnit její konfiguraci a měření samotné díky tomu probíhalo velmi rychle. Jako celek bych měření hodnotil jako pozitivní, protože se mi podařilo naměřit všechny hodnoty a konfigurací skříně a transformátoru jsem docílil na první pohled kladného rozdílu mezi umístěním uvnitř a vně nádoby.

7.3 Vyhodnocení ztrát

Při zpracování výsledků měření bylo mým hlavním cílem zjistit rozdíl (viz 6.3) ztrátových činných výkonů při různých umístěních transformátoru. Některé hodnoty výkonů jsem musel dopočítat a poté jsem mohl vytvořit graf (obr. 6.2), z kterého závislost ztrát plyne. Je jasné, že ztráty rostou s napětím. Bohužel kvůli konstrukční nedokonalosti byly ztráty do jmenovité hodnoty nepatrné a výkony byly stejné. Ovšem při přiblížení jmenovité hodnotě a pak hlavně při jejím překročení, začal být rozdíl velmi znatelný a dosáhl jsem rozdílu v procentuálním vyjádření 11,86%, což je v souladu s očekáváním v teoretické části (viz 4.7). Je jasné, že konkrétně u tohoto transformátoru byla volba přesyceného stavu dobrým krokem a zajistila lepší měřitelnost ztrát v nádobě. Zkoumání ztrát v rozsahu této bakalářské práce hodnotím jako úspěšné. Potvrdil jsem jejich přítomnost a především jsem je změřil. Dle mého názoru plyne z práce fakt, že ztráty v nádobě transformátoru jsou odvislé od dané konkrétní konfigurace a provozu transformátoru, popřípadě jeho zatížení. Pro přibližné matematické vyjádření ztrát obecně by bylo nutno provést mnoho měření, což bohužel není předmětem této práce.

7.4 Další možné pokračování a možný přínos

Závěrem této práce přemýšlím nad dalším možným vývojem tohoto tématu. Myslím, že prvním krokem by bylo měření v nádobě, která je na „míru šitá“ měřenému transformátoru a také měření vlivu posunu bočních stran. Dále by bylo přínosné danou konfiguraci namodelovat v některém prostředí, aby bylo patrné, jakým způsobem se vířivé proudy v nádobě uzavírají a dále porovnání simulace s naměřenými výsledky. V neposlední řadě by bylo vhodné zjistit vliv volby materiálu na průběh ztrát v nádobě. Jako přínosnou informaci bych viděl možnost snížení ztrát při znalosti jejich průběhu a to hlavně u transformátorů s výkony v řádech stovek MVA, kde by vysoké hodnoty ztrát v nádobě znamenaly nadměrné oteplení a namáhání celého transformátoru.

Seznam použitých zdrojů

[1] BARTOŠ, Václav; ČERVENÝ, Josef; HRUŠKA, Josef; KOTLANOVÁ, Anna; SKALA, Bohumil. Elektrické stroje. 1. vydání. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2006. 140 s. ISBN 80-7043-444-9.

[2] BARTOŠ, Václav. Elektrické stroje. 2. Vydání. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2004. 222 s. ISBN 80-7043-332-9.

[3] TŮMOVÁ, Olga; ČTVRTNÍK, Václav; GIRG, Josef; ŠVARNÝ, Jiří: Elektrická měření, měřící metody. 2. vydání. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2005. 218 s. ISBN 80-7043-412-0.

[4] URL: <http://www.edisontechcenter.org/Transformers.html> (cit 10.1.2012)

[5] URL: <http://www.cadazz.com/cad-software-history.htm> (cit 12.1.2012)

[6] FREIBAUER, Martin; VLÁČILOVÁ, Hana; VILÍMKOVÁ, Milena. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 2. aktualizované vydání. Brno : Computer Press, a.s., 2010. 326 s. ISBN 978-80-251-2504-5.

[8] KARNET, Václav: Přídavné ztráty v konstrukčních částech transformátoru, Diplomová práce, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2009.

[9] TRS, František: Stanovení ztrát v nádobě transformátoru, Diplomová práce, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2007.

[10] Obrázek 2.2 stažen z <http://cs.wikipedia.org/wiki/Transformátor> (18.12.2011)

Seznam příloh

Příloha A – Dno nádoby

Příloha B – Pevný bok nádoby

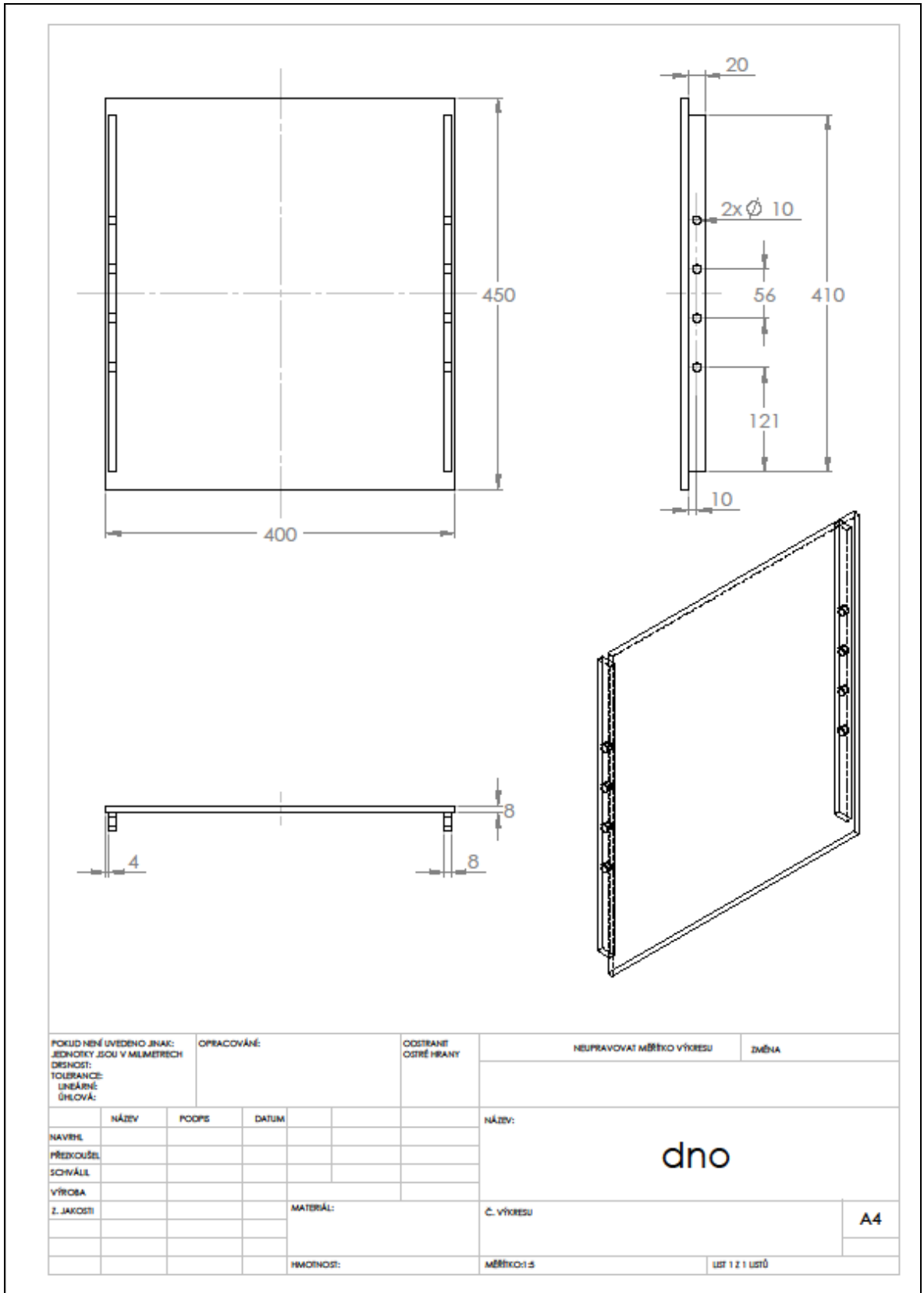
Příloha C – Posuvný bok nádoby

Příloha D – Víko nádoby

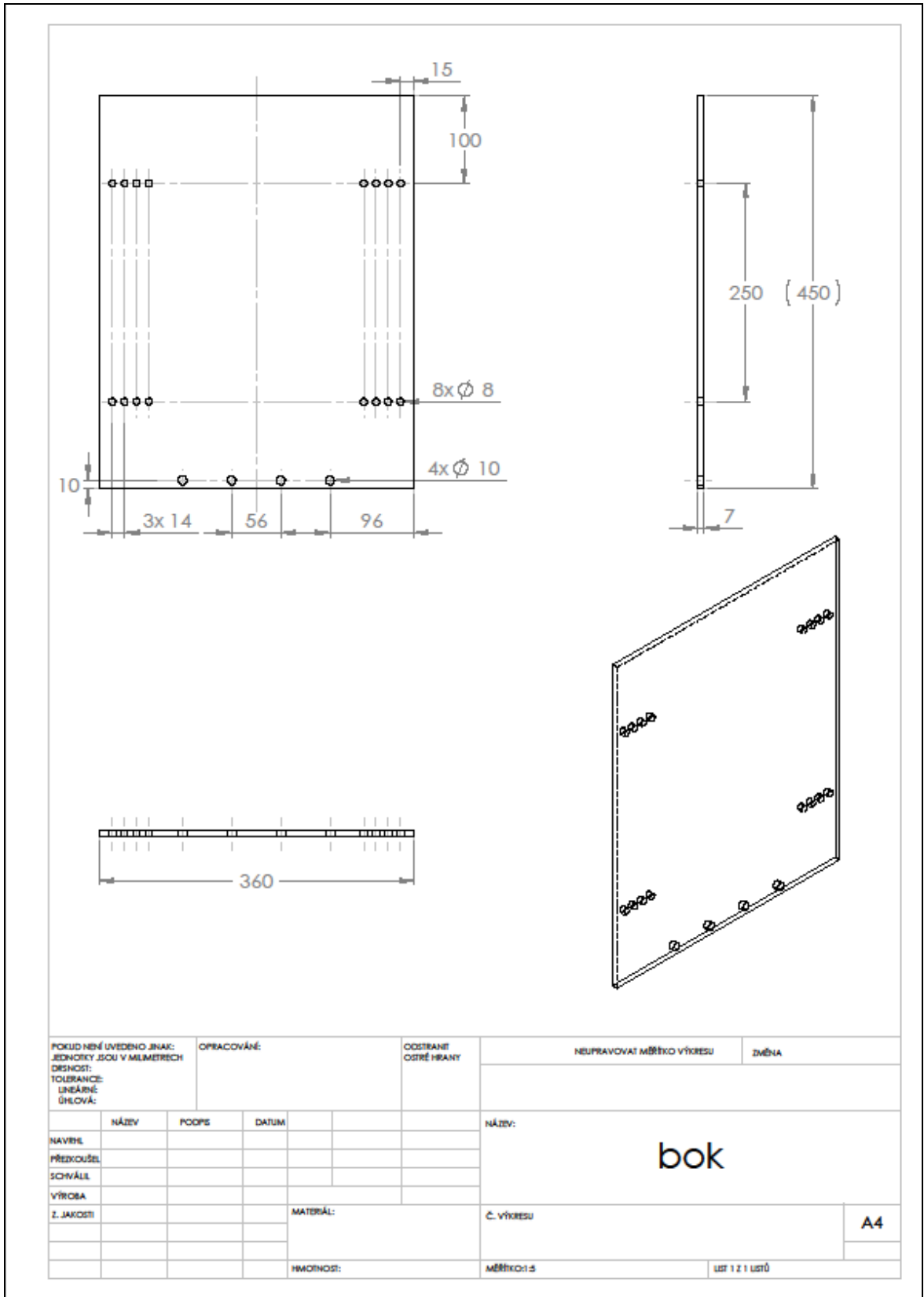
Příloha E – Nádoba

Příloha F – Výsledná nádoba a měřený transformátor

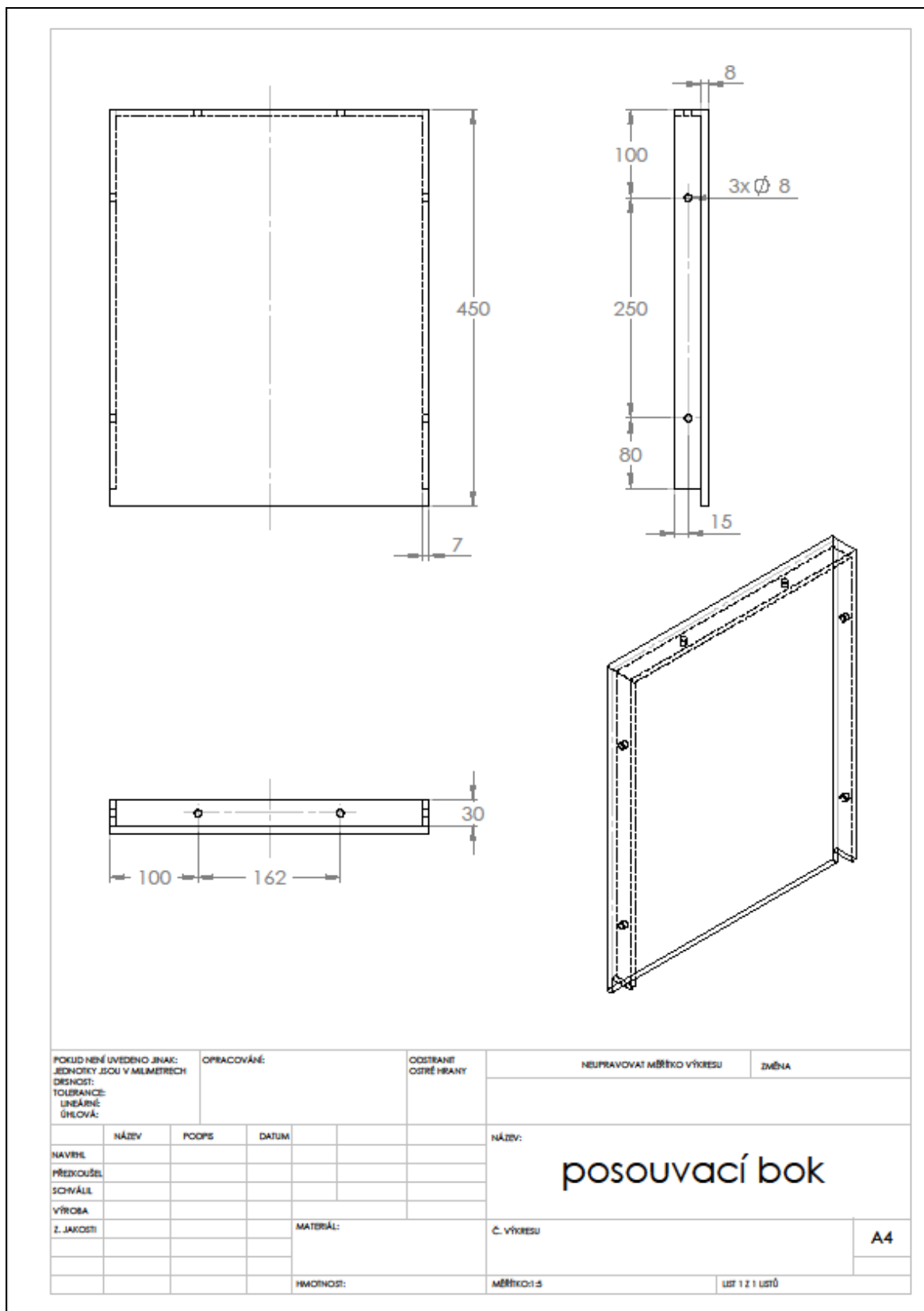
Příloha A – Dno nádoby



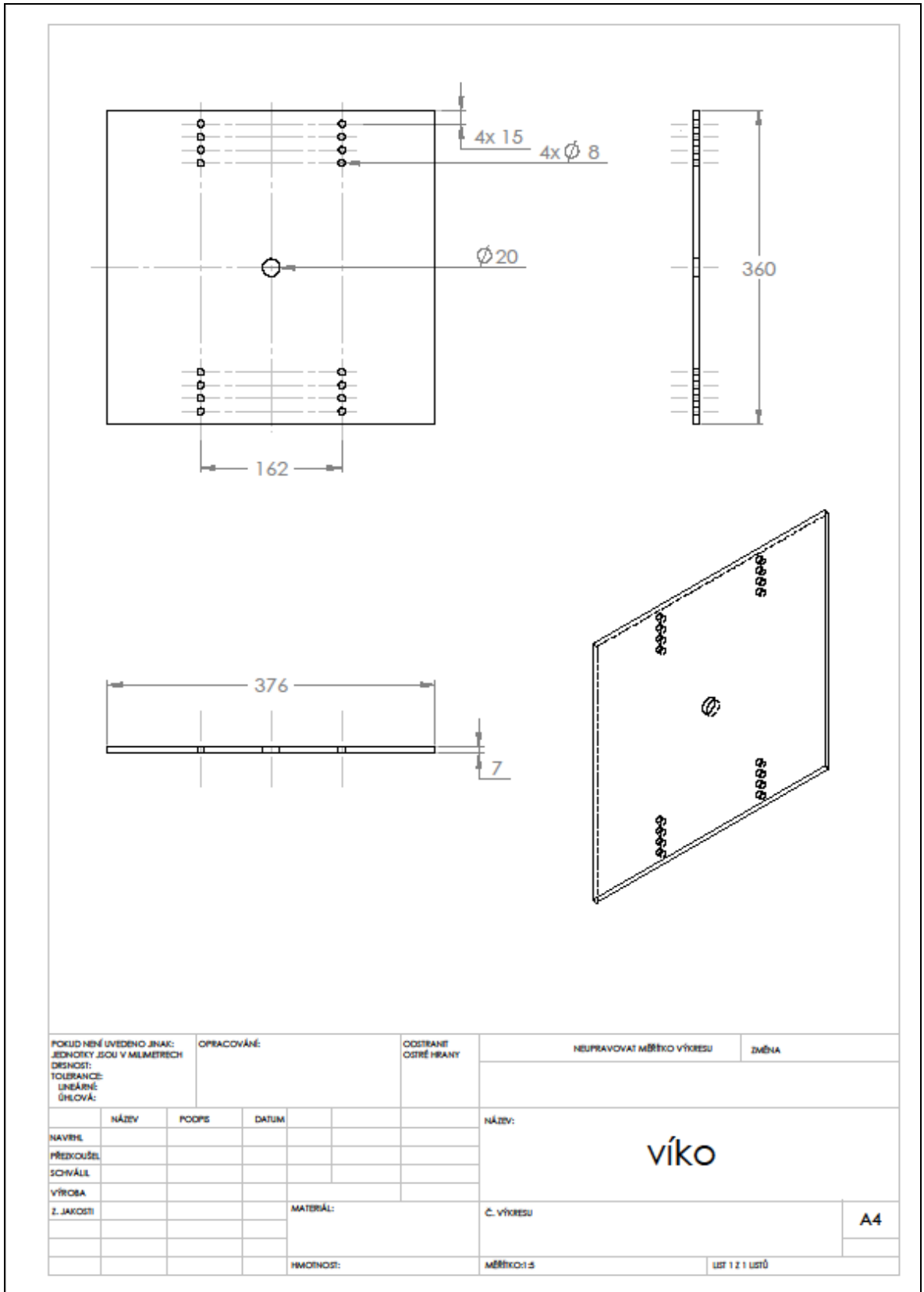
Příloha B – Pevný bok nádoby



Příloha C – Posuvný bok nádoby



Příloha D – Víko nádoby



Příloha E – Nádoba

The technical drawings illustrate the construction of a transformer tank. It includes a top view showing four corners with labels 'Článek' and a central circular feature. Two side views show the profile of the tank with labels 'Článek' and 'Článek'. An isometric view shows the three-dimensional structure of the tank with labels 'Článek' and 'Článek'.

POKUD NEJÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OPRACOVÁNÉ:		OSTRANIT OSTŘÍ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍVO VÝKRESU		ZMĚNA	
DEKOSTI: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHELOVÁ:									
	NÁZEV	POPS	DATUM			NÁZEV: kompletní nádoba			
NAVĚŠ									
PŘEDKOUŠEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI					MATERIÁL:	Č. VÝKRESU			
						A4			
					HMOTNOST:	MĚŘÍTKO: 1:10			
						LIST 1 Z 1 LISTŮ			

Příloha F – Výsledná nádoba a měřený transformátor

