

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ztráty v nádobě transformátoru

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ladislav SOUKUP**
Osobní číslo: **E09B0083P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Ztráty v nádobě transformátoru**
Zadávající 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 funkci transformátoru.
2. Provedte konstrukci nádoby transformátoru.
3. Změřte a vyhodnoťte ztráty v nádobě transformátoru.
4. Nakreslete konstrukční uspořádání ve 3D CAD softwaru.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

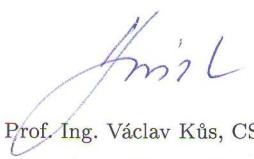
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

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

Anotace

Základní myšlenkou bakalářské práce je ověření rozložení ztrát v konstrukčních částech nádoby při měření transformátoru naprázdno. Nádoba nebyla ještě zhotovena, tak mi bylo potěšením udělat něco prospěšného pro univerzitu a nádobu vyrobit. Dále je zde popsána funkce transformátoru jako takového. Transformátor je obecně známé zařízení a jeho činnost zůstává neměnná. Nicméně bylo důležité nastínit základní funkci a principy transformátoru pro usnadnění měření a výpočtů výsledných ztrát. Bakalářská práce také obsahuje konstrukční uspořádání nádoby ve 3D CAD softwaru. 3D CAD softwary patří v dnešní době k nejpoužívanějším programům k výrobě nejrůznějších strojů ve strojírenském průmyslu. Jako 3D CAD software jsem si vybral program SolidWorks. Tento program jsem zvolil z důvodu příjemného pracovního prostředí a rovněž z důvodu praktických zkušeností nasbíraných ve specializovaném předmětu. V závěru je uvedena úspěšnost ověření teoretických předpokladů ohledně rozložení ztrát v konstrukčních částech nádoby transformátoru.

Klíčová slova

Transformátor, ztráty, výroba nádoby, konstrukční části nádoby transformátoru, měření naprázdno, 3D CAD software, SolidWorks

Abstract

The basic idea of the bachelor work is to verify the distribution losses in the container components during no-load measurement of the transformer. The container has not been made yet, so I was pleased to do something beneficial for the university and the container produced. There is also described its own function of the transformer. The transformer is generally known device and its operation remains unchangeable. However, it was important to outline the basic principles of transformer operation and to simplify the measurement and calculation of resulting losses. Bachelor work also includes design of the vessel in 3D CAD software. 3D CAD software is the most widely used programs for the production of various machines in the engineering industry nowadays. As 3D CAD software was chosen SolidWorks. I have made this selection because of a pleasant working environment as well as based on personal practical experience obtained at specialized lessons in the university. Verification of successfulness of theoretical presumptions regarding the distribution of losses in the construction parts of transformer – in vessel – is stated in the conclusion.

Keywords

Transformer, Electrical losses, production of the container, construction parts of transformer, no-load measurement, 3D CAD software, SolidWorks

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Ztráty v nádobě transformátoru vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury uvedené v seznamu a pomocí svých vlastních zkušeností.

Dále prohlašuji, že veškerý software, používaný k vypracování této bakalářské práce, je legální.

.....
V Plzni dne

.....
Ladislav Soukup

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval všem lidem, kteří se podíleli nebo mě podporovali ve vypracování této bakalářské práce. Za ochotu, poskytování cenných informací, čas, mně věnovaný bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lukáši Bouzkovi. Za podporu, poskytnutí klidné atmosféry při psaní bakalářské práce bych rád poděkoval svým rodičům, blízkým a kamarádům. V neposlední řadě bych rád poděkoval za spolupráci při výrobě nádoby transformátoru Václavu Mužíkovi.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ	12
1 TRANSFORMÁTOR	13
1.1 OBECNĚ	13
1.2 PROVEDENÍ TRANSFORMÁTORU.....	13
1.2.1 Jádrový transformátor.....	14
1.2.2 Plášťový transformátor	14
1.3 PRINCIP ČINNOSTI	15
1.4 FUNKCE TRANSFORMÁTORU	17
1.5 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	17
2 KONSTRUKCE NÁDOBY TRANSFORMÁTORU	18
2.1 MATERIÁL PRO VÝROBU NÁDOBY	18
2.2 POSTUP VÝROBY NÁDOBY.....	19
2.3 OBRÁZKY Z KONSTRUKCE NÁDOBY	19
3 NÁDOBY NA TRANSFORMÁTOR	21
4 MĚŘENÍ ZTRÁT V NÁDOBĚ TRANSFORMÁTORU	22
4.1 TEORETICKÝ ÚVOD.....	22
4.1.1 Ztráty nakrátko.....	22
4.1.2 Ztráty naprázdno.....	22
4.1.3 Ztráty přídatné.....	23
4.2 OBRÁZEK Z MĚŘENÍ ZTRÁT NAPRÁZDNO	23
4.3 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	24
4.3.1 Použité přístroje	24
4.3.2 Šítkové hodnoty transformátoru	25
4.4 POSTUP MĚŘENÍ.....	25
4.5 NAMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY	26
4.5.1 Příklad výpočtů.....	28
4.6 GRAFY.....	29
5 KONSTRUKČNÍ USPOŘADÁNÍ NÁDOBY VE 3D CAD SOFTWARE	30
5.1 PROGRAM SOLIDWORKS	30
5.2 POSTUP PŘI MODELOVÁNÍ NÁDOBY	30
5.3 NAMODELOVANÁ NÁDOBA.....	31
ZÁVĚR	32
VYHODNOCENÍ ZTRÁT V NÁDOBĚ TRANSFORMÁTORU	32
VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	33
POUŽITÁ LITERATURA	34
SEZNAM PŘÍLOH	35

Úvod

Úvodem bych chtěl říci, že žijeme ve stále rozvíjející se době, snažíme se staré věci zdokonalovat a vymýšlet zase nové. Tato myšlenka by se neobešla bez různých pokusů, vynalézavosti, měření, ověřování nových nápadů apod. Vybral jsem si proto technickou školu, protože mě poznávání a praktické ověřování veškerých věcí zajímá. Při výběru tématu pro bakalářskou práci jsem se snažil nejen o zajímavé téma, které by mě bavilo, ale i o téma, obsahující nějaké praktické dovednosti či ověření teoretických předpokladů pro danou věc. Na cvičení z elektrických strojů se mi dostalo informace, že téma, které má veškeré mé předpoklady, je k dispozici, a tak jsem se ho v mžiku ujal.

Teoretická část mé práce je zaměřena na funkci, princip činnosti transformátoru a největší využití transformátoru.

Vlastním cílem bakalářské práce je praktické ověření ztrát v nádobě transformátoru. Jestli se opravdu indukují vířivé proudy, které se uzavírají ve stěnách nádoby a obecně v nejbližších konstrukčních částech transformátoru, při měření transformátoru naprázdno. A jestli se tyto ztráty v podobě vířivých proudů dají spočítat z naměřených hodnot.

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Jednofázový jádrový transformátor [2]	14
Obr. 1.2 Jednofázový plášťový transformátor [2].....	14
Obr. 1.3 Jednofázový transformátor bez připojené zátěže [2].....	15
Obr. 1.4 Jednofázový transformátor s připojenou zátěží [2]	15
Obr. 1.5 Náhradní schéma transformátoru ve tvaru T-článku [2].....	17
Obr. 2.1 Zabroušení svárů.....	19
Obr. 2.2 Vrtání děr pro upevnění nádoby	19
Obr. 2.3 Připevnění dna a boku nádoby.....	20
Obr. 2.4 Připevnění boků nádoby	20
Obr. 2.5 Posuvný bok nádoby.....	20
Obr. 2.6 Druhý bok nádoby	20
Obr. 2.7 Kompletní nádoba.....	20
Obr. 4.1 Měření transformátoru naprázdno mimo nádobu	23
Obr. 4.2 Schéma zapojení	24
Obr. 4.3 Graf závislosti ztrát na napětí	29
Obr. 4.4 Graf nárůstu ztrát v nádobě v závislosti na napětí.....	29
Obr. 5.1 Konstrukční uspořádání nádoby ve 3D CAD softwaru	31

Seznam tabulek

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty při měření transformátoru naprázdno bez nádoby.....	26
Tab. 4.2 Naměřené hodnoty při měření transformátoru naprázdno v nádobě.....	27
Tab. 4.3 Tabulka rozdílu ztrát při měření v nádobě a bez nádoby.....	27

Seznam symbolů

Značka	Jednotka	Význam
X	$[\Omega]$	Reaktance
I	$[A]$	Proud
Φ	$[Wb]$	Tok
U	$[V]$	Napětí
U_i	$[V]$	Indukované napětí
N	$[-]$	Počet závitů
Ψ	$[Wb]$	Spřažený tok
t	$[s]$	Čas
ω	$[\text{rad s}^{-1}]$	Úhlová rychlost
f	$[Hz]$	Kmitočet
ΔP_k	$[W]$	Ztráty nakrátko
ΔP_0	$[W]$	Ztráty naprázdno
m	$[-]$	Počet fází
R	$[\Omega]$	Odpor
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
P	$[W]$	Činný výkon
Q	$[VAr]$	Jalový výkon
S	$[VA]$	Zdánlivý výkon
CAD	$[-]$	Computer Aided Design

1 Transformátor

1.1 Obecně

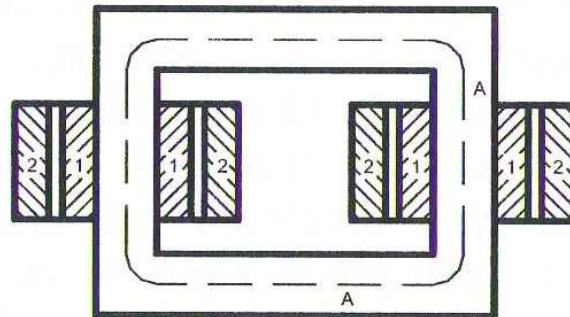
Transformátor je elektrické zařízení, které transformuje elektrickou energii. Mění hodnoty vstupního napětí a proudu na jiné požadované parametry. Forma energie na vstupu a výstupu zůstává pořád elektrická. Transformátor nemá žádnou pohyblivou část oproti točivým strojům a tudíž jeho náklady na údržbu jsou minimální. Lze u něj dosáhnout vysoké účinnosti přenosu elektrické energie. Transformátory se mohou vyrábět v mnoha modifikacích. Jmenovité výkony se pohybují od mVA až do několika set MVA, napětí může být nízké až vln, frekvence až do stovek MHz. Transformátory se vyrábějí dvouvinutové nebo vícevinutové, jednofázové nebo vícefázové. Obvykle bývají třífázové. [1] [2]

1.2 Provedení transformátoru

Transformátor se skládá z uzavřeného feromagnetického jádra a ze dvou vinutí (primárního a sekundárního), která jsou na něm navinuta. Feromagnetické jádro je složeno z navzájem izolovaných plechů. Důsledkem je omezení ztrát v železe. Transformátorové plechy se volí s ohledem na frekvenci. Pro frekvenci do stovek Hz se používají křemíkové oceli tloušťky 0,35 mm a pro vysoké frekvence lisované práškové feromagnetické slitiny. Základní provedení transformátorů můžeme rozdělit na jádrové a plášťové. [1] [2]

1.2.1 Jádrový transformátor

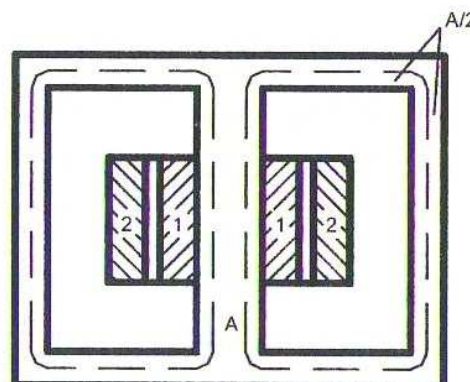
Jádrový transformátor se skládá z primárního a sekundárního vinutí, která jsou rozdělena na dvou jádrech a umístěna tak, že vinutí na nižší napětí je blíže jádra. Jádra jsou spojena spojkami, které mají přibližně stejný průřez, protože vedou hlavní magnetický tok. Schematické znázornění můžeme vidět na obr. 1.1. [2]



Obr. 1.1 Jednofázový jádrový transformátor

1.2.2 Plášťový transformátor

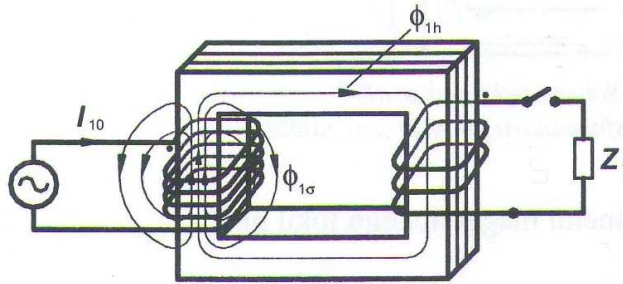
Plášťový transformátor má obě vinutí umístěné na středním sloupku, který se stará o vedení hlavního toku. Sloupek se rozděluje a uzavírá se spojkami a krajními jádry, na kterých není žádné vinutí. Spojky mají zpravidla poloviční průřez než jádra. Plášťový transformátor má také menší magnetické rozptylové toky a tedy úbytky $X_{1\sigma} i_1$ a $X_{2\sigma} i_2$, jeho sekundární napětí kolísá méně s měnící se zátěží, a je proto tvrdší než transformátor jádrový. Schematické znázornění na obr. 1.2. [2]



Obr. 1.2 Jednofázový plášťový transformátor

1.3 Princip činnosti

Princip činnosti transformátoru je založen na zákonu elektromagnetické indukce. Svorky primárního vinutí jsou zapojeny na zdroj střídavého napětí. Proud, který začne procházet primárním vinutím vybudí střídavý magnetický tok, který se zabírá se sekundárním vinutím a budí v něm střídavé napětí. Máme-li vodivé spojení mezi svorkami sekundárního vinutí a zátěží, začne zátěž protékat elektrický proud. [1] [2]



Obr. 1.3 Jednofázový transformátor bez připojené zátěže

Tok Φ_1 se skládá z hlavního toku Φ_{1h} a rozptylového toku $\Phi_{1\sigma}$.

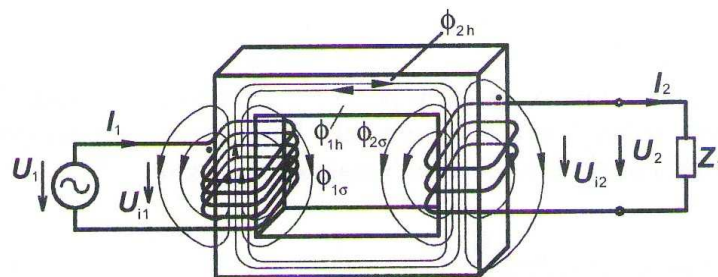
Hlavní tok Φ_{1h} se uzavírá feromagnetickým jádrem a budí napětí na sekundárním vinutí.

Rozptylový tok $\Phi_{1\sigma}$ se uzavírá pouze kolem vinutí primárního a nepodílí se na přenosu energie. [2]

$$\Phi_1(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{1\sigma}(t) \quad (1.3-1)$$

Při připojení zátěže na svorky sekundárního vinutí, začne zátěž protékat elektrický proud, který vyvolá tok $\Phi_2(t)$

$$\Phi_2(t) = \Phi_{2h}(t) + \Phi_{2\sigma}(t) \quad (1.3-2)$$



Obr. 1.4 Jednofázový transformátor s připojenou zátěží

Složky toku $\Phi_{1h}(t)$ a $\Phi_{2h}(t)$ se uzavírají na stejné dráze feromagnetického jádra a vytváří spolu výsledný hlavní tok $\Phi_h(t)$

$$\Phi_h(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{2h}(t) \quad (1.3-3)$$

Výsledný hlavní tok $\Phi_h(t)$ indukuje na vinutích vnitřní napětí

$$u_{i1} = N_1 \cdot \frac{d\phi_h}{dt} = \frac{d\psi_1}{dt} \quad (1.3-4)$$

$$u_{i1} = N_1 \cdot \frac{d\phi_h}{dt} = \frac{d\psi_2}{dt} \quad (1.3-5)$$

Pro harmonický časový průběh toku platí

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt}(N \cdot \Phi_m \cdot \sin \omega t) = N \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (1.3-6)$$

Efektivní hodnota indukovaného napětí pak vypadá následovně

$$U_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \Phi = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \quad (1.3-7)$$

Převod k se určí poměrem vnitřních indukovaných napětí

$$\frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{4,44 N_1 \Phi_{hm} f}{4,44 N_2 \Phi_{hm} f} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = k \cong \frac{U_1}{U_2} \quad (1.3-8)$$

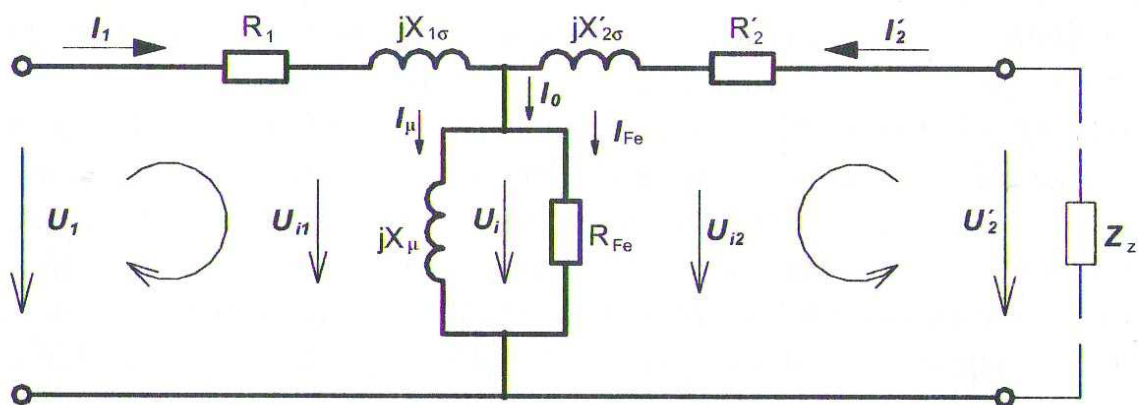
1.4 Funkce transformátoru

Hlavní funkcí transformátoru je transformovat elektrickou energii, tedy měnit parametry elektrických veličin. Jedná se o napětí, proud a impedanci. Další jeho vlastností je, že impedančně odděluje primární a sekundární stranu. Hlavní využití transformátoru je především v energetice, kde umožňuje přenos a rozvod elektrické energie.

1.5 Náhradní schéma transformátoru

Náhradní schéma transformátoru obsahuje pasivní prvky obvodu (odpory a indukčnosti). Vlastnosti těchto pasivních prvků odpovídají s jistými zjednodušujícími předpoklady vlastnostem transformátoru. Náhradní schéma platí pro harmonické průběhy veličin a ustálený stav. Lze jej popsat algebraickými rovnicemi při respektování Kirchhoffových zákonů. Jejich řešením získáme průběhy proudů ve schématu a hodnoty proudů v transformátoru. [2]

Když budeme uvažovat náhradní schéma a naměřené charakteristiky naprázdno a nakrátko, tak lze vypočítat hodnoty parametrů transformátoru (reaktance a odpory primárního a sekundárního vinutí). [2]



Obr. 1.5 Náhradní schéma transformátoru ve tvaru T-článku

Veličiny označené čárkou (sekundární strana transformátoru) jsou převedeny na stranu primární, to znamená že schéma platí pro transformátor s převodem 1. Schéma obecně platí pro všechny transformátory s libovolnými počty závitů N_1 a N_2 . [2]

Napěťové rovnice pro náhradní schéma:

$$\blacksquare U_1 = R_1 \cdot I_1 + jX_{1\sigma} \cdot I_1 + U_i = R_1 \cdot I_1 + jX_{1\sigma} \cdot I_1 + jX_{\mu}(I_1 + I'_2) \quad (1.5-1)$$

$$\blacksquare U'_2 = R'_2 \cdot I'_2 + jX'_{2\sigma} \cdot I'_2 + U_i = R'_2 \cdot I'_2 + jX'_{2\sigma} \cdot I'_2 + jX_{\mu}(I_1 + I'_2) \quad (1.5-2)$$

Po úpravě dostaneme

$$\blacksquare U_1 = (R_1 + jX_1) \cdot I_1 + jX_{\mu} \cdot I'_2 \quad (1.5-3)$$

$$\blacksquare U'_2 = jX_{\mu} \cdot I_1 + (R'_2 + jX'_2) \cdot I'_2 \quad (1.5-4)$$

2 Konstrukce nádoby transformátoru

Jelikož materiál pro výrobu nádoby na transformátor vážil několik desítek kilogramů a konstrukce nádoby vyžadovala osobu, která by se zabývala konstruováním podobných předmětů profesionálně, nebo dvě osoby nadmíru zručné, byli jsme proto určeni pro zkonstruování nádoby dva studenti stejného oboru.

2.1 Materiál pro výrobu nádoby

Jako výrobní materiál nám byly přiděleny ocelové plechy tloušťky 7 a 8 mm. Pro konstrukci nádoby jsme použili obyčejnou vrtačku a vrtáky do železa. Při vrtání bylo důležité vlastnit držák na vrtačku, kvůli vibracím při vrtání do železa. Dbali jsme taky na životnost vrtáků, a proto jsme při vrtání aplikovali vrtací olej. Spojení všech dílů jsme zajistili šrouby s matkami. V neposlední řadě jsme museli použít také brusku, protože sváry na námi obdrženém materiálu nebyly precizně zpracovány a zabroušeny. Důvodem bylo, že po upevnění bočních stran nebyla zajištěna dostatečná kolmost a tudíž byla vyloučena montáž zbylých stěn nádoby.

2.2 Postup výroby nádoby

Ocelové plechy jsme obdrželi předem zpracované na požadované parametry a našim úkolem bylo je nějakým způsobem sestavit dohromady, aby se nám tam vešel předem vybraný transformátor na měření. Materiál jsme si prohlédli, jestli bude vůbec vyhovovat našemu plánu konstrukce. Později jsme zjistili, že sváry, které nebyly pořádně zabroušeny, nám vadí v konstrukci, ale jednoduše jsme je poupravili pomocí brusky. Díry na šrouby jsme si pečlivě naměřili a poté jsme vyvrtali otvory. Prvotní myšlenka o upevnění ocelových plechů byla taková, že jsme měli udělat závity do děr závitníkem, ale z důvodu tvrdosti ocelového plechu jsme usoudili, že bude stačit upevnění pomocí šroubu a matky. Nádoby jsme sestavili tak, aby se boční strany nádoby daly posouvat směrem k transformátoru a naopak. Důvodem takového provedení bylo změřit ztráty v nádobě transformátoru v závislosti na tom, jak jsou od něj vzdáleny stěny nádoby. Jestli se nám to podařilo se dozvíme v kapitole vyhodnocení ztrát.

2.3 Obrázky z konstrukce nádoby



Obr. 2.1 Zabroušení svárů



Obr. 2.2 Vrtání děr pro upevnění nádoby



Obr. 2.3 Připevnění dna a boku nádoby



Obr. 2.4 Připevnění boků nádoby



Obr. 2.5 Posuvný bok nádoby



Obr. 2.6 Druhý bok nádoby



Obr. 2.7 Kompletní nádoba

3 Nádoby na transformátor

Nádoby na transformátor slouží obecně k ochraně transformátoru před vnějšími vlivy a jsou opatřeny různými médii jako je např. vzduch nebo olej, které slouží ke chlazení samotného transformátoru. [7]

U výkonových vysokonapěťových transformátorů přibližně do 1000 kVA a 6 kV bývá přirozené vzduchové chlazení s označením S (suché). Je-li transformátor tvořen z válcového vinutí, stavíme jej tak, aby jádra byla svislá. Transformátor s kotoučovým vinutím stavíme s vodorovnými jádry. Chceme-li dosáhnout účinnějšího vzduchového chlazení, je třeba nádobu opatřit ventilátorem. Vzduch je pak proháněn ventilátorem okolo vinutí železa. Tyto transformátory se pak značí SO (suché s větrákem). [7]

Jako druhým chladícím médiem u transformátorů může být olej. Teplo z oleje se odvádí nádobou přímo do okolí. Olej má větší izolační schopnost než vzduch, tudíž rozměry olejem chlazeného transformátoru jsou menší než u vzduchového transformátoru při stejném výkonu. Transformátory s hladkou nádobou mají většinou výkon přibližně do 50 kVA. Při větších výkonech již nestačí hladký povrch nádoby k odvádění ztrát, vznikající činností transformátoru, a musí se zvětšit vlnami, trubkami nebo radiátory. Transformátory s výkonem od 50 do 2500 kVA mají především vlnitou nádobu. Lepší chlazení mají transformátory s trubkami nebo radiátory. [7]

Účinnost olejového chlazení se může ještě zvětšit proháněním vzduchu kolem trubek nebo radiátorů. Toto chlazení se používá u transformátorů velkých výkonů. [7]

Nádoby na transformátor se vyrábějí ze železných plechů. Jako chladivo u olejových transformátorů se používá speciálního čistého minerálního oleje bez kyselin, vody a vzduchu. [7]

4 Měření ztrát v nádobě transformátoru

4.1 Teoretický úvod

Nesmíme si myslet, že transformátor pracuje beze ztrát. Ve skutečnosti je jeho činnost spojena se ztrátami. Ty představují několik desetin procenta z celkového výkonu. Můžeme je dělit na ztráty přídavné, ztráty naprázdno a nakrátko. Ztráty naprázdno můžeme považovat jako ztráty v magnetickém obvodu a označují se pojmem ztráty v železe. Ztráty nakrátko považujeme jako ztráty ve vinutí transformátoru a jsou rovny ztrátám Joulovým. Přídavné ztráty zahrnují ztráty vířivými proudy v masivních konstrukčních částech a ztráty skinefektem. [1] [2]

4.1.1 Ztráty nakrátko

Ztráty nakrátko se značí ΔP_k a jsou závislé na zatěžovacím proudu. Jsou to ztráty způsobené průchodem proudu vinutím transformátoru. Platí zde vztah $\Delta P_k = \Delta P_j = m(R_1 + R_2)I^2$, kde m je počet fází a odpory R_1 , R_2 jsou tzv. střídavé opory, které se liší vlivem skinefektu od odporů vinutí určené stejnosměrným proudem. [1]

4.1.2 Ztráty naprázdno

Ztráty naprázdno ΔP_0 jsou závislé na napětí a nezávislé na zatěžovacím proudu. Ztráty naprázdno jsou ztráty v železe a platí pro ně vzorec $\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeV} + \Delta P_{FeH}$, kde ΔP_{FeV} jsou ztráty vířivými proudy a ΔP_{FeH} jsou ztráty hysterezní. Vznikají vždy, když je transformátor připojen na napětí, bez ohledu na zatížení. Ztráty hysterezní $\Delta P_{FeH} = B^2 f$ jsou úměrné ploše hysterezní křivky. Čím je tato smyčka užší, tím jsou hysterezní ztráty menší. Jsou proto omezovány použitím plechů s úzkou hysterezní smyčkou. Ztráty vířivými proudy $\Delta P_{FeV} = B^2 f^2$ vznikají v plechu vlivem působení magnetického pole, které indukuje magnetické napětí. Můžeme je omezit listěným provedením jader transformátorů a také přidáním křemíku, který snižuje elektrickou vodivost, do materiálu plechů. [1]

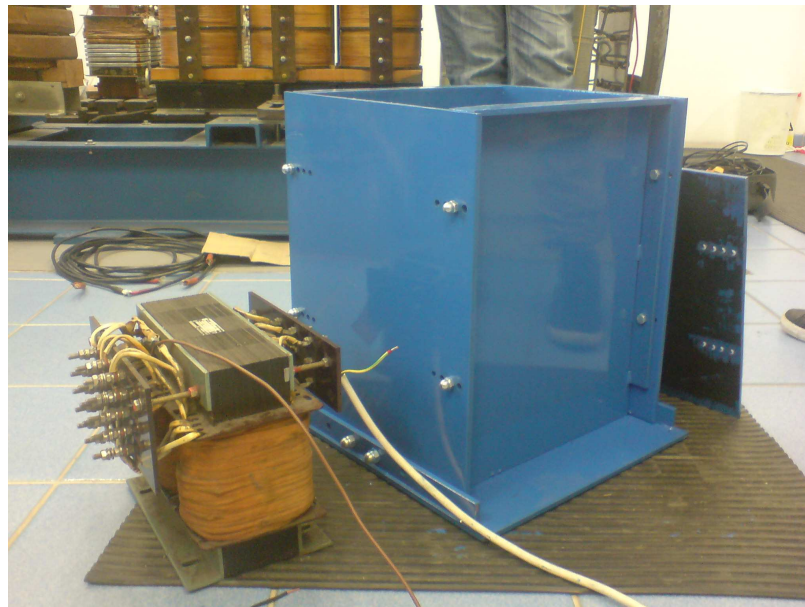
4.1.3 Ztráty přídatné

Jak už bylo řečeno mezi ztráty přídatné patří ztráty vířivými proudy v masivních konstrukčních částech a ztráty skinefektém. Tyto ztráty jsou způsobeny rozptylovým magnetickým tokem, vyvolaným ve vinutí a v přívodních vodičích. Jsou důsledkem vířivých proudů, které se indukují v kovových částech v dosahu rozptylového magnetického toku. V našem případě se jedná o nádobu transformátoru. Přídatné ztráty jsou závislé na parametrech vinutí, umístění transformátoru v nádobě, velikosti nádoby apod. [5]

Přídatné ztráty jsou vůči ztrátám v železe zanedbatelné, proto považujeme celý příkon transformátoru v chodu naprázdno za ztráty v železe. Oproti tomu, když umístíme transformátor do nádoby a měříme ho v chodu naprázdno, tak musíme počítat, že se budou indukovat vířivé proudy ve stěnách nádoby a ztráty se nám o nějaké procento navýší.

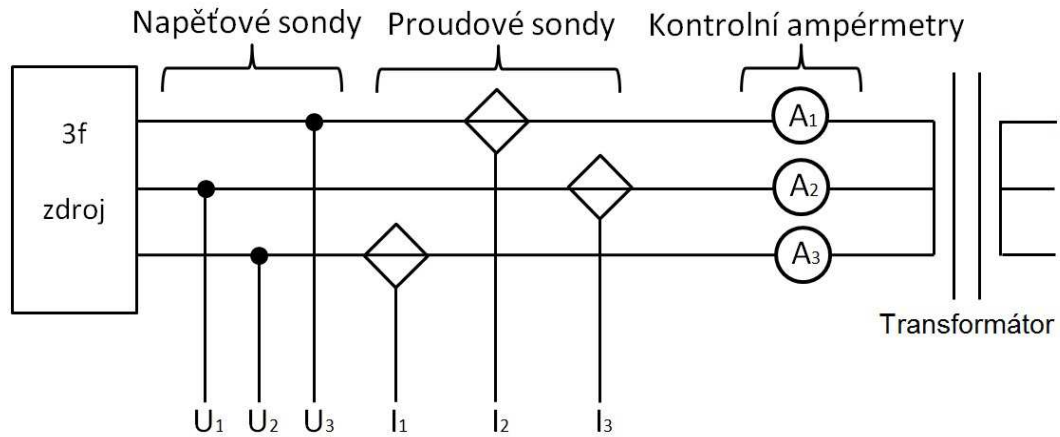
Tyto ztráty lze omezit tím, že izolujeme kovové části nádoby, aby se jimi neuzavíral tok a nezpůsoboval ztráty.

4.2 Obrázek z měření ztrát naprázdno



Obr. 4.6 Měření transformátoru naprázdno mimo nádobu

4.3 Schéma zapojení



Obr. 7.2 Schéma zapojení

4.3.1 Použité přístroje

Pro měření transformátoru naprázdno v nádobě a bez nádoby jsem používal tyto měřící přístroje:

- Třífázový analyzátor výkonu HIOKI 3166 (tři proudové a tři napěťové sondy)
- Napájecí booster
- Tři ručičkové ampérmetry

4.3.2 Štítkové hodnoty transformátoru

Štítkové hodnoty měřeného transformátoru:

- Transformátorek: ZSE PRAHA
- ČSN351310, 3fázový
- TYP: INC-3 259
- Primár: 3x380 +/- 5-7 V
- Sekundár: 3x75-92 V
- Zdánlivý výkon: 3000 VA
- Jmenovitý proud: 18,8 A
- Frekvence: 50/60 Hz
- Made in Czechoslovakia: 48262/80 V.Č.

4.4 Postup měření

Sestavil jsem si obvod pro měření transformátoru naprázdno pomocí uvedených měřících přístrojů. V prvním kroku jsem si změřil transformátor naprázdno bez nádoby. Při měření nízkých hodnot proudů nedokázal třífázový analyzátor výkonu ukázat hodnoty proudu z důvodu nevyhovujícího rozsahu, proto jsem měl zapojené tři ručičkové ampérmetry. Postupně jsem zvyšoval napětí v rozumném kroku a odečítal hodnoty proudů jednotlivých fází a účinniku $\cos\phi$. Tyto hodnoty jsem následně použil pro vypočítání činného, jalového a zdánlivého výkonu. V průběhu měření jsem musel kontrolovat rozsahy ampérmetrů z důvodu destrukce, které mi při vyšších hodnotách proudu sloužily už jen jako kontrolní. Transformátor jsem měřil až vysoko nad jmenovitou hodnotu napětí do $U = 500\text{ V}$ z důvodu větší patrnosti rozdílu ztrát mezi měřením bez nádoby a vně nádoby.

V druhém kroku jsem si změřil transformátor shodným způsobem uvnitř nádoby. Následně jsem z vypočítaných hodnot zhotovil průběhy ztrát v závislosti na velikosti napětí a porovnal, což bylo cílem bakalářské práce.

4.5 Naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty při měření transformátoru naprázdno bez nádoby

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

Pozn.: Barevně jsou naznačeny dopočítané hodnoty, které nám třífázový analyzátor výkonu HIOKI 3166 nedokázal ukázat.

Tab. 4.2 Naměřené hodnoty při měření transformátoru naprázdno v nádobě

U1 [V]	U2 [V]	I1 [A]	I3 [A]	I2 [A]	Iav [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

Pozn.: Barevně jsou naznačeny dopočítané hodnoty, které nám třífázový analyzátor výkonu HIOKI 3166 nedokázal ukázat.

Tab. 4.3 Tabulka rozdílů ztrát při měření v nádobě a bez 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

4.5.1 Příklady výpočtů

Příklady výpočtů jsou uváděny pro měření transformátoru naprázdno v nádobě pro napětí

$$U = \frac{U_1 + U_2}{2} = \frac{40,90 + 41,00}{2} = 40,95 \text{ V.} \quad (4.5.1-1)$$

- pro činný výkon

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{av} \cdot \cos \varphi \quad (4.5.1-2)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot 40,95 \cdot 0,02866 \cdot 0,37 = 0,75 \text{ W} \quad (4.5.1-3)$$

- pro jalový výkon

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{av} \cdot \sin \varphi \quad (4.5.1-4)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot 40,95 \cdot 0,02866 \cdot 0,93 = 1,89 \text{ VAr} \quad (4.5.1-5)$$

- pro zdánlivý výkon

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4.5.1-6)$$

$$S = \sqrt{0,75^2 + 1,89^2} = 2,03 \text{ VA} \quad (4.5.1-7)$$

- pro $\sin \varphi$

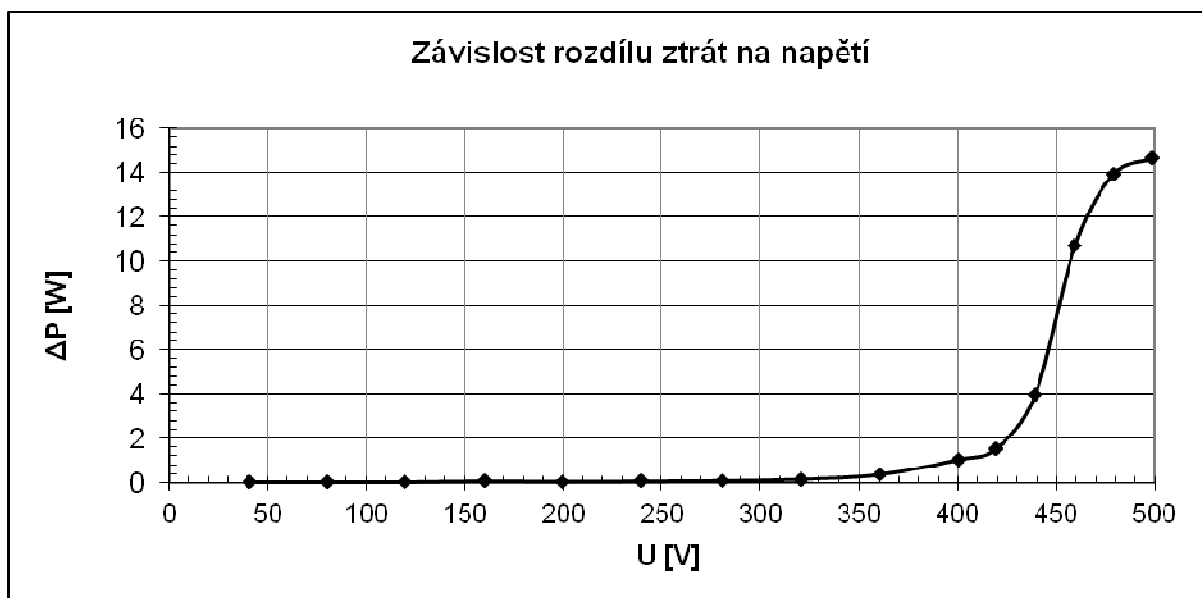
$$\sin \varphi = \sin[\cos^{-1}(\cos \varphi)] \quad (4.5.1-8)$$

$$\sin \varphi = \sin[\cos^{-1}(0,37)] = 0,93 \quad (4.5.1-9)$$

4.6 Grafy



Obr. 4.3 Graf závislosti ztrát na napětí



Obr. 4.4 Graf nárůstu ztrát v nádobě v závislosti na napětí

5 Konstrukční uspořádání nádoby ve 3D CAD softwaru

Jako prostředí pro vytvoření konstrukčního uspořádání nádoby ve 3D CAD softwaru jsem si vybral program SolidWorks.

5.1 Program SolidWorks

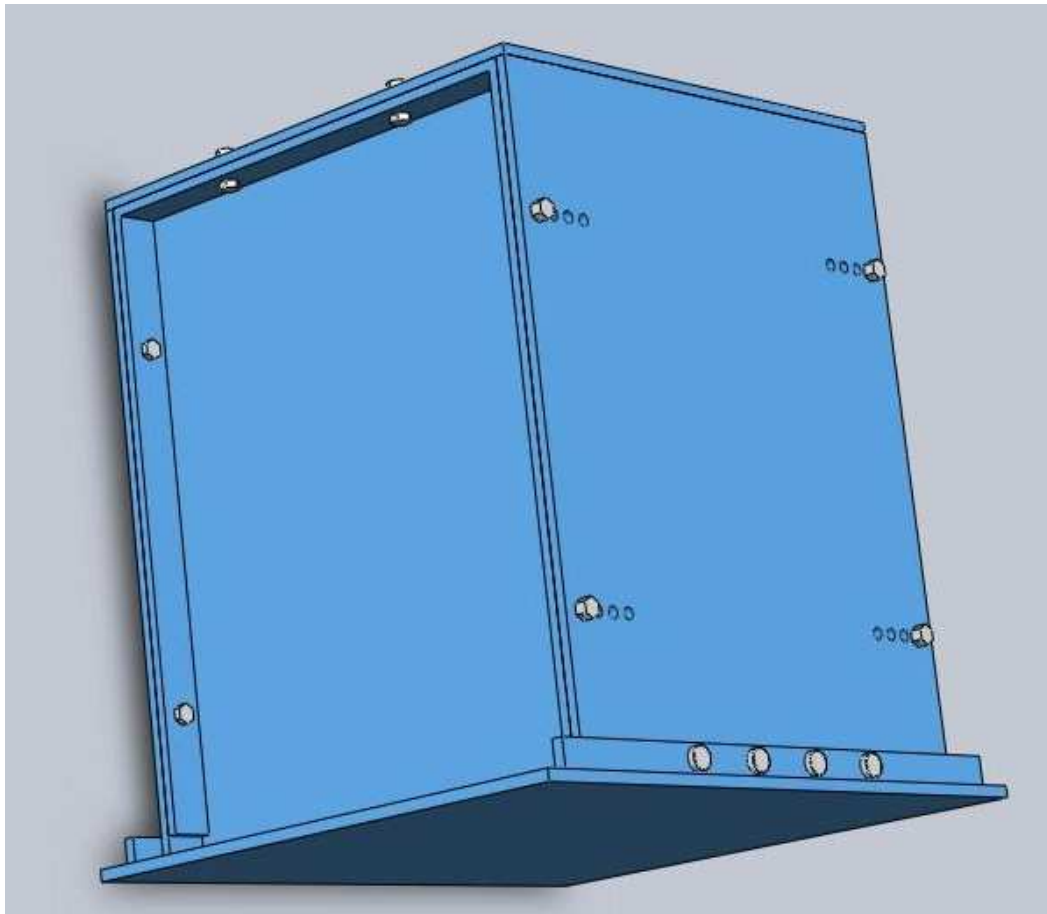
Program SolidWorks je parametrický 3D modelář. Nabízí výkonné objemové i plošné modelování pro strojírenství, práci s neomezeně rozsáhlými sestavami a automatické generování výkresové dokumentace. Dále disponuje i pokročilými funkcemi pro návrh plechových dílů, plastových dílů, forem a svářenců. Umožňuje také komunikaci s dalšími CAD programy. Je to tedy vynikající nástroj pro projektanty a konstruktéry v nejrůznějších odvětvích dnešního průmyslu a designu. [4]

5.2 Postup při modelování nádoby

Při modelování nádoby jsem postupoval tak, že jsem si nejdříve vytvořil všechny části, ze kterých se nádoba skládá. Následovně bych popsal např. výrobu boku nádoby. V programu SolidWorks jsem si otevřel nový díl, vybral jsem si rovinu, na kterou budu chtít začít kreslit a načrtnul jsem si libovolný obdélník. Pomocí kót jsem pak upravil velikost obdélníku na požadované parametry. Pro uvedení geometrického tvaru z 2D do 3D struktury se v programu používají prvky jako je přidání vysunutím, odebrání vysunutím, přidání tažením po křivce, přidání spojením profilů apod. V mém případě se jednalo tedy o prvek přidání vysunutím. Znovu jsem teď už mnou vyrobené těleso okótoval na požadovanou velikost tloušťky stěny. Dále mi ještě zbývaly vyrobit díry na šrouby. Ty jsem zajistil načrtnutím kružnic na vhodné pozice a odebráním kružnic skrz těleso.

Podobným způsobem jsem vytvořil všechny části nádoby. Při výrobě šroubů se muselo postupovat malinko rozdílně. Drážky na šroubu jsem vytvořil vložením osy do šroubu, podle které rotovala následně vložená šroubovice. Na začátek šroubovice jsem v kolmém směru načrtnul obdélník, vybral jsem z nabídky prvek odebrat tažením po křivce a tím se mi vytvořily drážky na šroubu. Matky jsem vyrobil podobným způsobem. Nyní už jsem měl všechny díly pro vytvoření výsledné nádoby, a tak jsem si mohl v programu SolidWorks otevřít sestavu, vložit do ní veškeré potřebné díly a přesnost sestavení jsem zajistil pomocí vazeb.

5.3 Namodelovaná nádoba



Obr. 5.1 Konstrukční uspořádání nádoby ve 3D CAD softwaru

Závěr

V závěru bych rád uvedl vyhodnocení měření ztrát v nádobě transformátoru. Zda se nám povedlo vyrobit vhodnou nádobu pro zvolený transformátor a jak velkých ztrát jsem docílil při měření.

Vyhodnocení ztrát v nádobě transformátoru

Během pokusů měření ztrát v nádobě transformátoru jsem postupně zjišťoval, že rozdíly ztrát mezi měřením transformátoru mimo nádobu a v nádobě jsou minimální. Bohužel se nám nepodařilo vyrobit rozměrově přesnou nádobu, do které by transformátor přesně pasoval. Nakonec jsem tedy posouvat boky nádoby nepotřeboval a rovnou je připevnil na nejmenší vzdálenost tak, aby vzdálenosti mezi konstrukcí transformátoru a konstrukcí nádoby byly minimální. Tím byla zajištěna větší patrnost rozdílu ztrát mezi měřením transformátoru mimo nádobu a uvnitř nádoby. Jako měřicí metodu jsem zvolil měření transformátoru naprázdno. Při téhle měřicí metodě se mi indukují vířivé proudy do všech kovových částí v dosahu rozptylového magnetického toku. Jak je vidět z *obr. 4.3*, transformátor jsem měřil nad jmenovitou hodnotu jeho napětí z toho důvodu, že až nad jmenovitou hodnotou se projevil větší nárůst ztrát, které se uzavíraly v podobě vířivých proudů ve stěnách nádoby. *Obr. 4.4* popisuje přímý rozdíl ztrát mezi měřením transformátoru naprázdno v nádobě a mimo nádobu. Je jasně patrné, že ztráty začaly výrazněji vzrůstat až za jmenovitou hodnotou napětí transformátoru. Tímto jsem docílil závěru měření.

Vyhodnocení měření

Měření bych vyhodnotil kladným způsobem, jelikož jsem potvrdil teoretické předpoklady, že při měření transformátoru naprázdno v nádobě narůstají ztráty v podobě vířivých proudů a uzavírají se v kovových částech v dosahu rozptylového magnetického toku. Bohužel se nárůst ztrát projevil až za jmenovitou hodnotou napětí transformátoru z důvodu větší vzdálenosti konstrukčních částí transformátoru a nádoby. Dalším předpokladem pro navázání na bakalářskou práci by mě napadla úvaha, jestli se mi projeví větší rozdíl nárůstu ztrát i před jmenovitou hodnotou napětí transformátoru, když bude konstrukční uspořádání nádoby a transformátoru k sobě co nejpřesněji přiléhat ze všech stran. Vliv různých kovových materiálů pro tvorbu nádoby na velikosti ztrát uzavírajících se v těchto částech. Tento námět bych nechal otevřený pro návaznost na mou bakalářskou práci např. diplomovou prací.

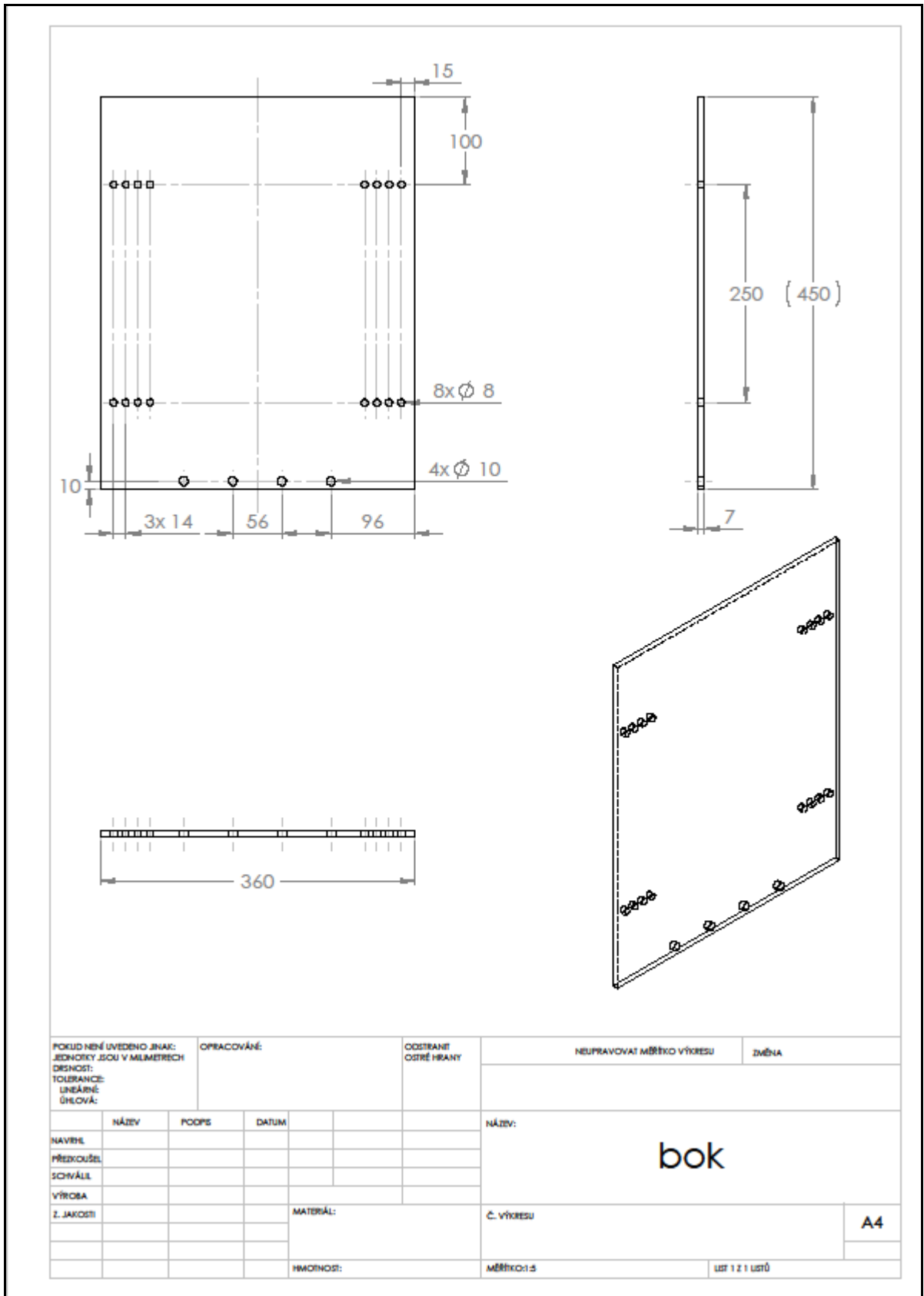
Použitá literatura

- [1] BARTOŠ, Václav. Elektrické stroje. 2.vydání. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2004. 222 s. ISBN 80-7043-332-9.
- [2] BARTOŠ, Václav, et al. Elektrické stroje. 1.vydání. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2006. 140 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [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] FREIBAUER, Martin; VLÁČILOVÁ, Hana; VILÍMKOVÁ, Milena. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 2.aktualizované vydání. Brno : Computer Press, a.s., 2010. 326 s. Dostupné z WWW: <www.solidvision.cz>. ISBN 978-80-251-2504-5.
- [5] KARNET, Václav: Přídavné ztráty v konstrukčních částech transformátoru, Diplomová práce, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2009.
- [6] TRS, František: Stanovení ztrát v nádobě transformátoru, Diplomová práce, Fakulta elektrotechnická, Plzeň, 2007.
- [7] URL: <http://elektrika.cz/data/clanky/pvnt010823> (cit. 19.5.2012)

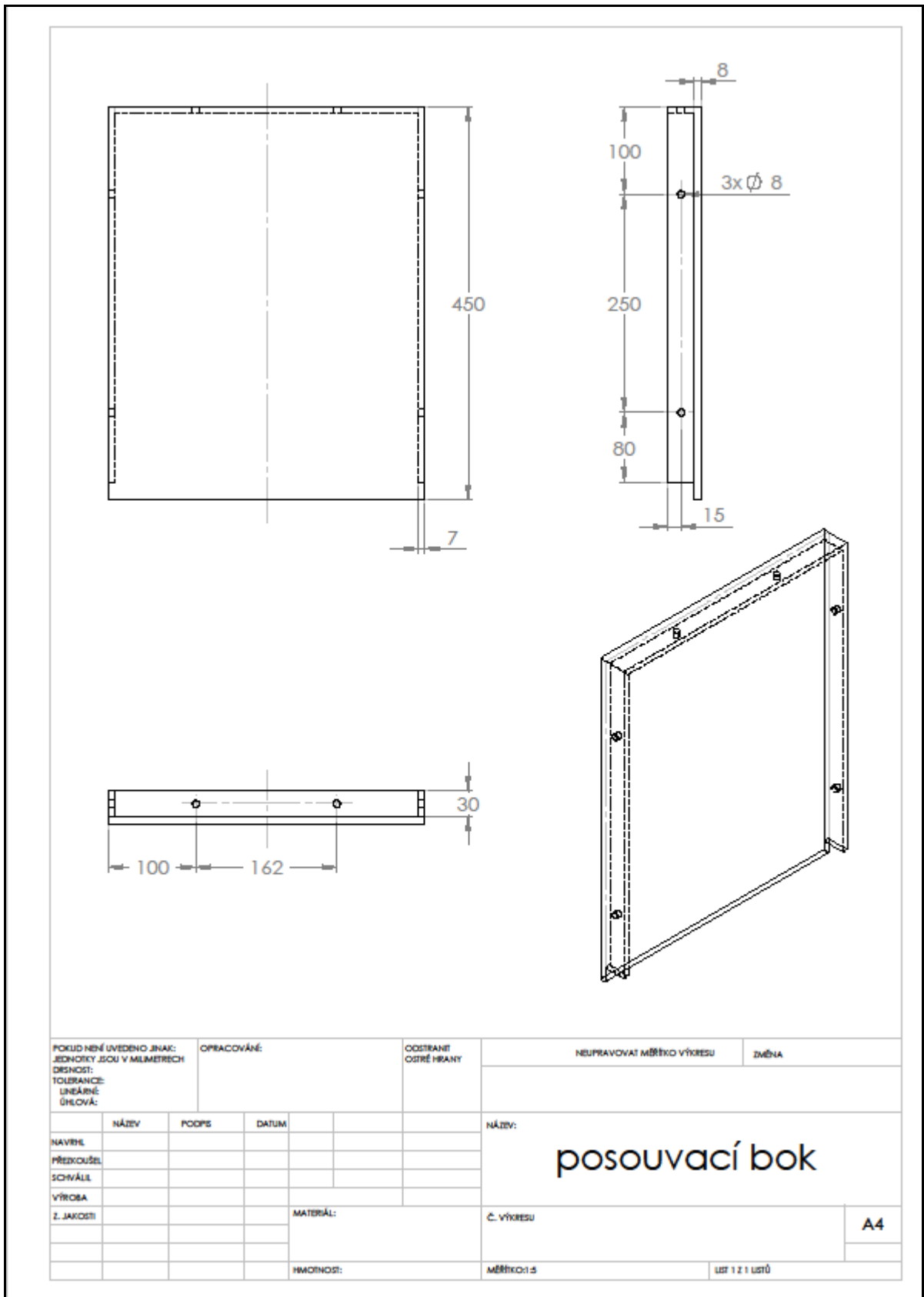
Seznam Příloh

Příloha A - Pevný bok nádoby	36
Příloha B - Posuvný bok nádoby	37
Příloha C - Dno nádoby	38
Příloha D - Víko nádoby	39
Příloha E - Kompletní nádoba	40

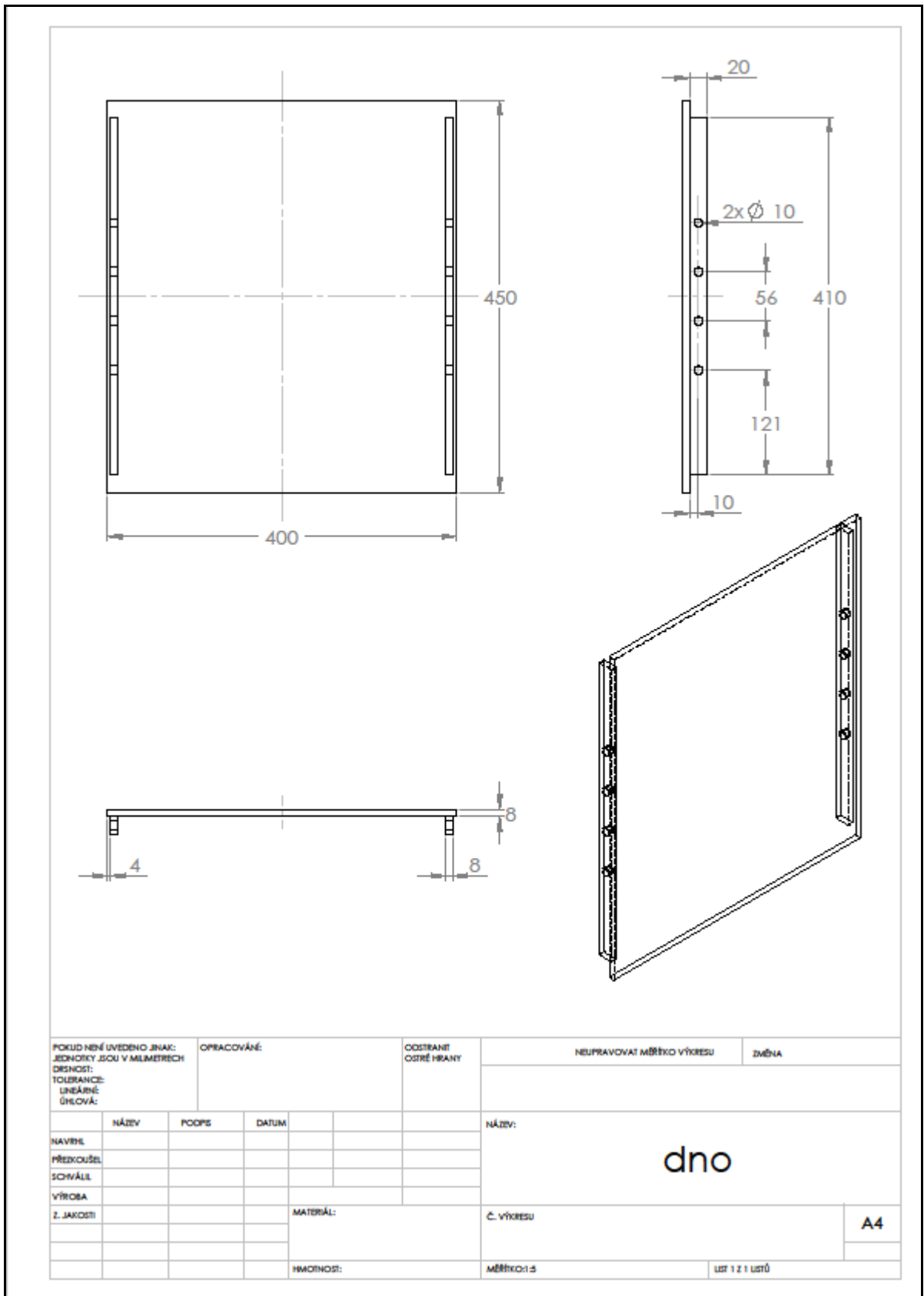
Příloha A - Pevný bok nádoby



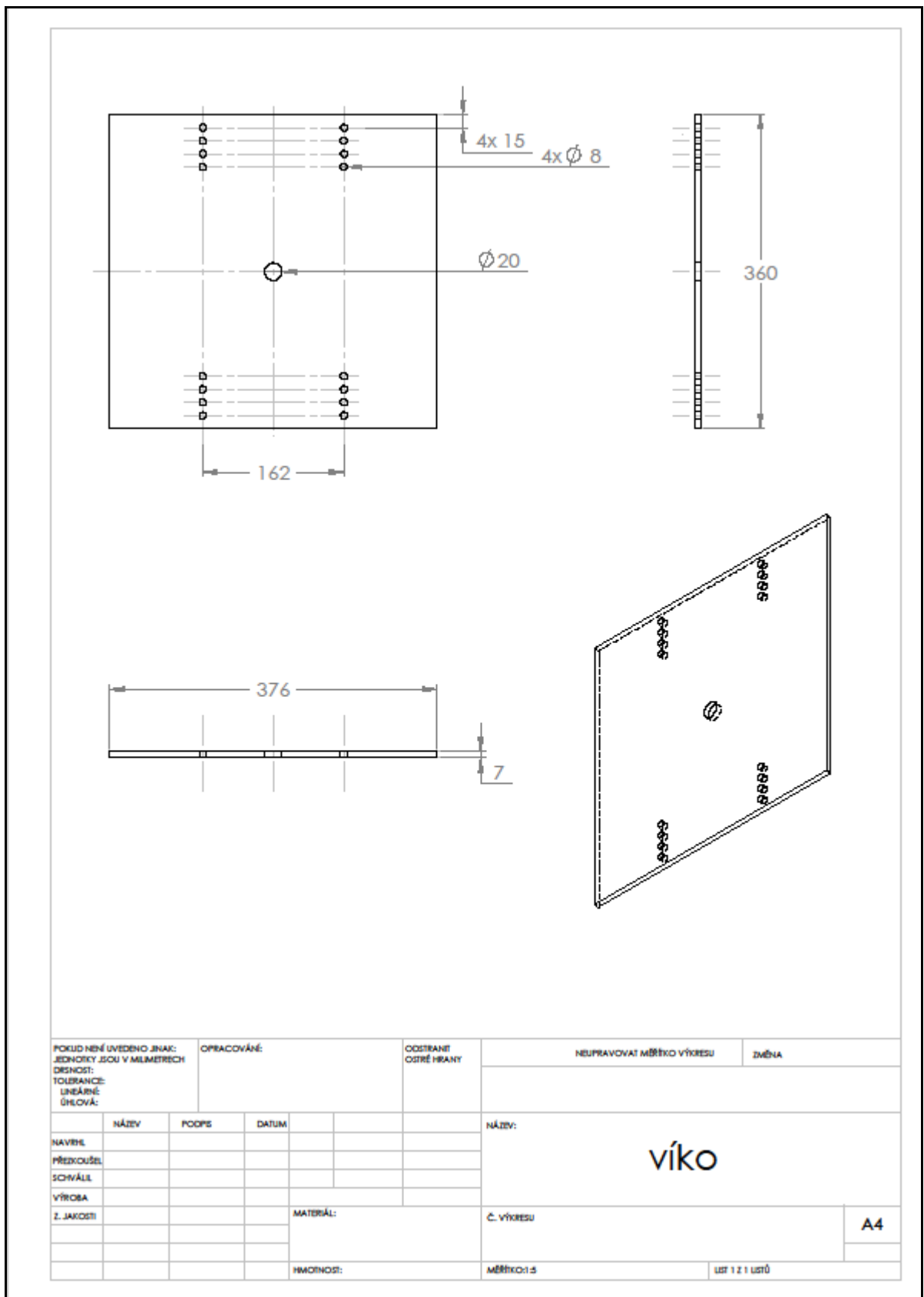
Příloha B - Posuvný bok nádoby



Příloha C - Dno nádoby



Příloha D - Víko nádoby



Příloha E - Kompletní nádoba

The drawing consists of four views of a rectangular transformer tank:

- Top View:** Shows a square cross-section with a central circular hole and four vertical lines representing the tank walls.
- Front View:** Shows the tank's profile with a flat top and a slightly raised bottom edge.
- Side View:** Shows the tank's profile from the opposite side, highlighting the thickness of the walls.
- Isometric View:** Shows the 3D structure of the tank, including the top, bottom, and side panels, with a central hole on the top panel.

POKUD NEBĚ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH TOLERANCE: LINEÁRNĚ: ÚHLOVĚ:		OPRACOVÁNÉ:		OSTRAHIT OSTŘÍ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
NÁZEV	POPS	DATUM			NÁZEV: <h2 style="margin: 0;">kompletní nádoba</h2>	
NAVŘEL						
PŘEDKOUŠEL						
SCHVÁLIL						
VÝROBA					Č. VÝKRESU	A4
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		
				HMOTNOST:	MĚŘÍTKO: 1:10	LIST 1 Z 1 LISTŮ