

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

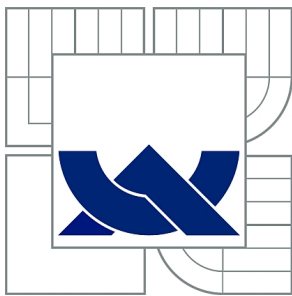
NÁVRH ŘÍZENÉHO MODULOVÉHO ZDROJE 6,3KA/5VAC PRO  
OTEPLOVACÍ ZKOUŠKY A TESTY JISTIČŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

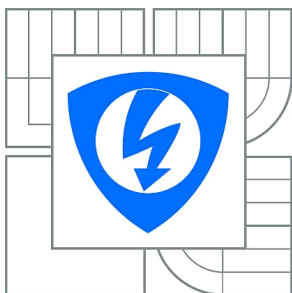
LADISLAV ZOLICH

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## NÁVRH ŘÍZENÉHO MODULOVÉHO ZDROJE 6,3KA/5VAC PRO OTEPLOVACÍ ZKOUŠKY A TESTY JISTIČŮ

DRAFT CONTROLLED MODULAR SOURCE 6,3KA / 5VAC FOR WARMING TRIALS AND TESTS  
BREAKERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LADISLAV ZOLICH

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR DOHNAL, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Ladislav Zolich

**ID:** 154914

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh řízeného modulového zdroje 6,3kA/5VAC pro oteplovací zkoušky a testy jističů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se s návrhem a funkcí transformátorů na velké proudy
- 2) Navrhněte a ve spolupráci s vedoucím práce sestrojte modulární AC zdroj o výkonu 25kVA
- 3) Vyřešte zapínací obvod transformátoru/ů aby nedocházelo k překmitu první periody proudu

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, Otto a kol. : Elektrické přístroje učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických, SNTL 1985
- [2] Měřička J., Zoubek Z. : Elektrické stroje, skriptum ČVUT 1990
- [3] Patočka, Miroslav: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice, VUTIUM 2011

**Termín zadání:** 22.9.2014

**Termín odevzdání:** 2.6.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Dohnal, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cílem práce je navrhnout toroidní transformátor o zadaných parametrech. Práce je zaměřena na seznámení se s principem transformátorů, jejich obecným návrhem a hlavně na návrhu zadaného transformátoru. Návrh transformátoru obsahuje určení materiálu jádra, jeho velikosti, poté spočítání magnetické indukce, proudu naprázdno, určení průřezu vodiče použitého na vinutí a spočítání ztrát v jádře a ve vinutí. Dále je zde řešen návrh mechanických částí transformátoru, jako je svorkovnice, podstava a způsob chlazení. Velký důraz je zde také kladen na zalití transformátoru do epoxidu a navržení formy pro zalévání. Nakonec je zde také měření transformátoru a způsob napájení.

## **Abstract**

The main object of this thesis is to design a toroidal transformer on the given parameters. Project is focused on learning about principles of transformers, it's designing and mainly on designing the given transformer. Designing contains material selection of the core of the transformer, its size, then calculating magnetic flux, no-load current, cross-section of conductor and calculating no-load losses and joule losses. The next part is designing the mechanical parts of transformer, its terminal plate, base and cooling system. Thesis is also mainly focused on designing the form for potting the transformer in epoxy resins. In the end is measurement and form of powering the transformer.

## **Klíčová slova**

Epoxid, forma, jádro, magnetická indukce, návrh, toroid, transformátor, vinutí, ztráty naprázdno, ztráty ve vinutí.

## **Keywords**

Epoxid, form, core, core losses, design, joule losses, magnetic flux, toroid, transformer, winding.

## **Bibliografická citace**

ZOLICH, L. *Návrh řízeného modulového zdroje 6,3kA/5VAC pro oteplovací zkoušky a testy jističů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Dohnal, Ph.D..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Návrh řízeného modulového zdroje 6,3kA/5VAC pro oteplovací zkoušky testy jističů* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

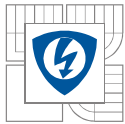
Podpis autora .....

## **Poděkování**

Rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Dohnalovi, Ph.D. za velice účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a také za velmi cenné rady během řešení bakalářské práce.

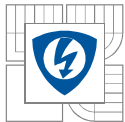
V Brně dne .....

Podpis autora .....



## Obsah

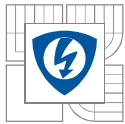
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>5</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 TRANSFORMÁTOR</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 TRANSFORMÁTORY OBECNĚ</b> .....	<b>12</b>
1.1.1 PRINCIP TRANSFORMÁTORU .....	12
1.1.2 KONSTRUKCE A PROVEDENÍ .....	13
<b>1.2 NÁVRH TRANSFORMÁTORŮ OBECNĚ</b> .....	<b>15</b>
1.2.1 URČENÍ POČTU ZÁVITŮ PRIMÁRNÍHO VINUTÍ.....	15
1.2.2 MAGNETIZAČNÍ PROUD.....	17
1.2.3 ZTRÁTY, ÚČINNOST A PROUD NAPRÁZDNO.....	17
1.2.4 PRŮŘEZ VODIČE .....	18
<b>2 NÁVRH TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1 ZADANÉ A ZÁKLADNÍ PARAMETRY</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2 VOLBA MATERIÁLU JÁDRA, URČENÍ PERMEABILITY</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3 VELIKOST A PRŮŘEZ JÁDRA</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4 MAGNETICKÁ INDUKCE</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5 ZTRÁTY NAPRÁZDNO, MAGNETIZAČNÍ PROUD A PROUD NAPRÁZDNO</b> .....	<b>23</b>
<b>2.6 VINUTÍ</b> .....	<b>24</b>
<b>2.7 ÚČINNOST</b> .....	<b>25</b>
<b>2.8 OTEPLENÍ</b> .....	<b>26</b>
<b>3 NÁVRH MECHANICKÉHO ŘEŠENÍ</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1 VZHLED JÁDRA S VINUTÍM</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2 PRIMÁRNÍ STRANA</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3 SEKUNDÁRNÍ STRANA</b> .....	<b>28</b>
<b>3.4 SVORKOVNICE</b> .....	<b>29</b>
<b>3.5 CHLAZENÍ – EPOXID, MĚŘENÍ TEPLoty, TEPELNÁ POJISTKA, FORMY PRO ZALÉVÁNÍ,     MECHANICKÉ DODATKY</b> .....	<b>30</b>
<b>3.6 ZALÉVÁNÍ DO EPOXIDU</b> .....	<b>42</b>
<b>4 NAPÁJENÍ</b> .....	<b>45</b>
<b>5 MĚŘENÍ</b> .....	<b>45</b>
<b>6 ZÁVĚR</b> .....	<b>49</b>



---

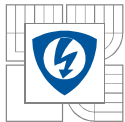
<b>LITERATURA .....</b>	<b>51</b>
-------------------------	-----------





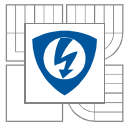
## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1</i> Princip funkce transformátoru [5].....	13
<i>Obr. 1.2</i> Plášťový transformátor [3].....	14
<i>Obr. 1.3</i> Jádrový transformátor [3].....	14
<i>Obr. 1.4</i> Toroidní jádro.....	15
<i>Obr. 1.5</i> Vrstvy jsou vinuty v opačném směru [5].....	16
<i>Obr. 1.6</i> Vrstvy jsou vinuty ve stejném směru [5]. .....	16
<i>Obr. 2.1</i> Relativní amplitudová permeabilita v závislosti na magnetické indukci u plechů válcovaných za studena tloušťky 0,35 mm. Překresleno podle Obr. 6.5.5-2 v literatuře [5].21	
<i>Obr. 2.2</i> Přibližný model jádra. Povrchově neupravený.....	22
<i>Obr. 2.3</i> Nákres jádra.....	22
<i>Obr. 3.1</i> Hotové jádro s vinutím a izolací. ....	27
<i>Obr. 3.2</i> Všech devět transformátorů. ....	28
<i>Obr. 3.3</i> Přípojnice 120x10x500.....	29
<i>Obr. 3.4</i> Svorkovnice.....	29
<i>Obr. 3.5</i> Příklad svorkovnice pro 8 A. ....	30
<i>Obr. 3.6</i> Forma pro zalévání do epoxidu. ....	32
<i>Obr. 3.7</i> Rozměry formy. ....	32
<i>Obr. 3.8</i> Řez J-J z Obr. 3.7.....	33
<i>Obr. 3.9</i> Detail zkosení a zaoblení. ....	33
<i>Obr.3.10</i> Roura KG 400. ( <a href="http://www.pcvalfa.cz/pr-img/66/1/max/20535c53-fa48-4b3d-ba53-070b56b156d5.jpg">http://www.pcvalfa.cz/pr-img/66/1/max/20535c53-fa48-4b3d-ba53-070b56b156d5.jpg</a> ).....	34
<i>Obr. 3.11</i> Forma z trubek KG. ....	35
<i>Obr. 3.12</i> Rozměry nové formy.....	35
<i>Obr. 3.13</i> Transformátor po zalití.....	36
<i>Obr. 3.14</i> Detail zalití termistoru.....	36
<i>Obr. 3.15</i> Detail zalití šroubů. ....	37
<i>Obr. 3.16</i> Navržená podstava.....	37
<i>Obr. 3.17</i> Šroub DIN603 M10, matice DIN934 M10, podložka DIN125 M10.....	37
<i>Obr. 3.18</i> Rozměry podstavy. ....	38
<i>Obr. 3.19</i> Zalitý transformátor s podstavou.....	38
<i>Obr. 3.20</i> Detail podstavy. ....	39



---

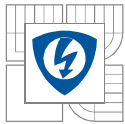
<i>Obr. 3.21</i> <i>Plastová krabička. (<a href="http://www.gme.cz/img/cache/800x600/627/058/krabicka-plastova-wm032-i-abs-obrazek-1.jpg">http://www.gme.cz/img/cache/800x600/627/058/krabicka-plastova-wm032-i-abs-obrazek-1.jpg</a>)</i> .....	40
<i>Obr. 3.22</i> <i>Spodní díl krabičky s dírami.</i> .....	40
<i>Obr. 3.23</i> <i>Svorkovnice a krabička na dolité podstavě. Vrchní díl krabičky je v modelu zprůhledněn.</i> .....	41
<i>Obr. 3.24</i> <i>Finální vzhled transformátoru. Krabička je zde bez vrchního dílu.</i> .....	41
<i>Obr. 3.25</i> <i>Epoxidová pryskyřice.</i> .....	42
<i>Obr. 3.26</i> <i>Tvrdidlo.</i> .....	42
<i>Obr. 3.27</i> <i>Smíchání kompozice s plnidlem.</i> .....	43
<i>Obr. 3.28</i> <i>Nachystaná forma pro zalévání.</i> .....	43
<i>Obr. 3.29</i> <i>Zalévání.</i> .....	44
<i>Obr. 3.30</i> <i>Zalitý transformátor.</i> .....	44
<i>Obr. 3.31</i> <i>Transformátor po zalití a zbrúšení.</i> .....	45
<i>Obr. 5.1</i> <i>Měření.</i> .....	46



---

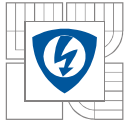
## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Souhrn parametrů transformátoru. ....</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 2 Měření naprázdno. <math>U_{01}</math>= primární napětí naprázdno [V], <math>I_{01}</math>=primární proud naprázdno [mA].....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 3 Měření při zatížení (pouze jedno vinutí, tj. 360 závitů). <math>U_1</math>=primární napětí [V], <math>I_1</math>=primární proud [A], <math>I_2</math>=sekundární proud [A]. ....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 4 Měření při zatížení (obě vinutí spojená do série, tj. 720 závitů). <math>U_1</math>=primární napětí [V], <math>I_1</math>=primární proud [A], <math>I_2</math>=sekundární proud [A]. ....</i>	<i>47</i>



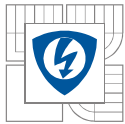
## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\Psi(t)$	[Wb]	Spřažený magnetický tok v čase t
t	[s]	Čas
$\Psi_0$	[Wb]	Obecná počáteční integrační konstanta
u(t)	[V]	Svorkové napětí v čase t
i(t)	[A]	Proud v čase t
B(t)	[T]	Magnetická indukce v čase t
B	[T]	Magnetická indukce
S	[m <sup>2</sup> ]	Plocha
$\alpha$	[°]	Úhel
N	[-]	Počet závitů
l	[m]	Délka
$\Phi$	[Wb]	Magnetický tok uvnitř jádra
B <sub>Fe</sub>	[T]	Magnetická indukce železného jádra
S <sub>Fe</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Plocha železného jádra
B <sub>max</sub>	[T]	Maximální magnetická indukce v jádře transformátoru
$\Delta T$	[K]	Oteplení
N <sub>1</sub>	[-]	Počet primárních závitů
U <sub>1ef</sub>	[V]	Primární efektivní napětí
f	[Hz]	Frekvence
S <sub>j</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Průřez jádra transformátoru
k <sub>p,FE</sub>	[-]	Činitel plnění železa
S <sub>o</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Plocha okna
$\sigma$	[A·m <sup>-2</sup> ]	Proudová hustota
k <sub>p,Cu</sub>	[-]	Činitel plnění vinutí
k <sub>t</sub>	[-]	Činitel tvaru
k <sub>i</sub>	[-]	Činitel izolace
k <sub>př</sub>	[-]	Činitel přídatný
d <sub>Cu</sub>	[m]	Průměr vodiče
d	[m]	Průměr izolace
I <sub>μFe</sub>	[A]	Magnetizační proud



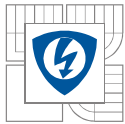
---

$N_1$	[-]	Počet primárních závitů
$l_{Fe}$	[m]	Délka magnetické siločáry v železe
$\mu_{Fe}$	[-]	Relativní permeabilita železa
$\mu_0$	[H·m <sup>-1</sup> ]	Permeabilita vakua
$l_v$	[m]	Délka vzduchové mezery
$I_{0\check{c}}$	[A]	Činná složka proudu naprázdno
$Z$	[W·kg <sup>-1</sup> ]	Ztrátové číslo
$m_{Fe}$	[kg]	váha jádra
$P_{Fe}$	[W]	Ztráty naprázdno (ztráty v jádře/železe)
$\gamma_{Fe}$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Měrná hmotnost železa
$V_j$	[m <sup>3</sup> ]	Objem jádra
$\eta$	[-]	Účinnost
$P_{2\check{c}}$	[W]	Činný výkon zátěže
$I_0$	[A]	Proud naprázdno
$R$	[Ω]	Odpor
$\rho_{Cu}$	[Ω·mm·m <sup>2</sup> ]	Měrný odpor mědi
$S_{Cu}$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez vodiče
$P_{Cu}$	[W]	Ztráty ve vinutí (Joulovy ztráty)
$I_{1ef}$	[A]	Primární efektivní proud
$I_2$	[A]	Sekundární proud
$N_2$	[-]	Počet sekundárních závitů
$Q$	[VAC]	Jalový výkon
$U_2$	[V]	Sekundární napětí
$p$	[-]	Převod transformátoru
$S$	[-]	Zdánlivý výkon
$\cos\varphi$	[-]	Účinník
GOSS		Grain Oriented Silicon Steel
$\mu_r$	[-]	Relativní permeabilita
$d_1$	[mm]	Vnitřní průměr jádra
$d_2$	[mm]	Vnější průměr jádra
$h$	[mm]	Výška jádra



---

$I_{\mu\text{Fe}720}$	[A]	Magnetizační proud při 720 závitů
$I_{\mu\text{Fe}360}$	[A]	Magnetizační proud při 360 závitů
$I_{0720}$	[A]	Proud naprázdno při 360 závitů
$I_{0360}$	[A]	Proud naprázdno při 360 závitů
$l_{720}$	[m]	Délka vinutí při 720 závitů
$R_{720}$	[ $\Omega$ ]	Odpor 720-ti závitového vinutí
$\rho_{\text{Cu},20}$	[ $\Omega \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^2$ ]	Měrný odpor mědi při 20°C
$l_{360}$	[m]	Délka 360-ti závitového vinutí
$R_{360}$	[ $\Omega$ ]	Odpor 360-ti závitového vinutí
$P_{\text{Cu}720}$	[W]	Ztráty ve vinutí při 720 závitů
$P_{\text{Cu}360}$	[W]	Ztráty ve vinutí při 360 závitů
$\rho$	[ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	Měrná hmotnost mědi
$m_{\text{Cu}}$	[kg]	Hmotnost vinutí
$V$	[ $\text{m}^{-3}$ ]	Objem vodiče
$r$	[m]	poloměr vodiče
$\Delta P$	[W]	Celkové ztráty
$\theta_0$	[°C]	Teplota okolí
$\theta$	[°C]	Teplota po oteplení
$\Delta T$	[K]	Dovolené oteplení
$\rho_{\theta 0}$	[ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	Měrný odpor mědi při teplotě okolí
$\rho_{\theta}$	[ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	Měrný odpor mědi při teplotě po oteplení
$R_{760,\theta}$	[ $\Omega$ ]	Odpor při teplotě po oteplení
$U_{01}$	[V]	Primární (vstupní) napětí naprázdno
$I_{01}$	[mA]	Primární (vstupní) proud naprázdno
$U_1$	[V]	Primární (vstupní) napětí
$I_1$	[A]	Primární (vstupní) proud
$I_2$	[A]	Sekundární (výstupní) proud



---

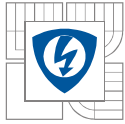
## ÚVOD

Práce je zaměřena na návrh a konstrukci zdroje na velké proudy. Jako zdroj bude transformátor. Navrhovaný transformátor bude sloužit k oteplovací zkoušce jističů. Průtok proudu vodičem způsobuje jeho zahřívání a tím i tepelné ztráty. Oteplovací zkouškou se tedy ověřuje, zda průchodem jmenovitého proudu přístrojem některá jeho část nepřekročí dovolené oteplení [1]. Tato zkouška spadá do kategorie typových zkoušek, kde se ověřuje konstrukce, jestli vyhovuje normám. Typové zkoušky se provádějí po vývoji a jsou organizovány do jednotlivých sledů, jako jsou např. ověření provozních vlastností a prověření zkratových schopností. Zkušební přístroj či zařízení musí projít všemi těmito sledy, aby typovou zkouškou prošel [2]. Oteplení přístroje se tedy zkouší při jmenovitém proudu a jmenovitém kmitočtu. Přístroj musí být úplně nový a musí obsahovat všechny kryty. Dále musí být namontován v pracovní poloze. Přístroj ani přívody nesmí být v celém průběhu zkoušky vystavovány vnějšímu ohřívání či ochlazování. Kontroluje se to měřením teploty na svorkách přístroje a na přívodech ve vzdálenosti 1 m od přístroje. Přístroje se zkouší, dokud teplota stoupá více jak 1°C za hodinu [1].

Než se začne s navrhováním transformátoru, je nutné nejdříve pochopit, jak transformátor funguje. Princip funkce transformátoru je uveden v první kapitole, kde mimo jiné je i konstrukce a provedení transformátorů a také návrh transformátoru obecně. Při návrhu zadaného transformátoru se bude vycházet z informací v literatuře [5], kde je výstižně popsán postup při návrhu a konstrukci. Postup v této práci je o trochu jiný, než který je uveden v [5], jelikož je zde již zadán počet primárních a sekundárních závitů a magnetická indukce je neznámá. Samotný návrh je řešen v kapitole 2, kde se počítá magnetická indukce, volí materiál, určuje průřez vodiče a počítají ztráty jak ve vinutí, tak v železe. Nakonec je vypočítána celková účinnost transformátoru. Jak bude transformátor vypadat, je obsaženo v kapitole 0, kde se řeší mechanický návrh transformátoru. Tím se myslí způsob chlazení, svorkovnice, podstava a další dodatky. Transformátor bude chlazen pomocí epoxidové pryskyřice, do které bude transformátor zalit. V kapitole 3 se tedy řeší i forma, do které se bude transformátor zalévat. Dále je řešen způsob napájení a na konec měření transformátoru.

Transformátor je navinut na toroidním jádře. Sekundární vinutí není navinuto na jádře transformátoru, ale je řešeno jako šest přípojníc vedených oknem jádra. Transformátor bude řešen jako modulový. Je celkem 9 modulů, kde každý modul má svůj vlastní určitý zdánlivý výkon. Výhodou modulárního zdroje je, že se dá libovolně poskládat tak, jaký je zrovna zapotřebí výkon. Tím se dosáhne značná úspora energie.

Jádro transformátoru je vyráběno firmou Therma FM. Navinutí a zabandážování je zhotoveno firmou JK- Elektra.



# 1 TRANSFORMÁTOR

## 1.1 Transformátory obecně

Transformátory jsou netočivé elektrické stroje pracující na principu elektromagnetické indukce. Jejich hlavním účelem je snižovat či zvyšovat střídavé napětí. Mohou sloužit i jako měniče kmitočtu [3][4].

Největší význam mají transformátory výkonové, které se používají pro přenos a rozvod elektrické energie. Tyto transformátory dosahují až 1000 MW a napětí až 800 kV. Při dálkovém přenosu energie slouží ke zvýšení napětí a zároveň ke zmenšení proudu. Tím se dosáhne menších ztrát na vedení. Takto zvýšené napětí se poté musí zmenšit na hodnotu vhodnou pro elektrické spotřebiče. Pro měření napětí, proudů a výkonů se používají měřicí transformátory proudu a napětí. Další skupinou jsou tzv. transformátory zvláštní, které se používají zejména ve slaboproudu jako oddělovací či impulsní transformátory [3][4].

### 1.1.1 Princip transformátoru

Jak již je zmíněno výše, princip je založen na zákonu elektromagnetické indukce. Napájíme-li jedno vinutí transformátoru (primární vinutí) střídavým napětím, vzniká ve feromagnetickém jádře transformátoru magnetický tok a indukuje se napětí na druhém vinutí (sekundární vinutí). Tvar tohoto zákona v integrálním tvaru je následující:

$$\Psi(t) = \Psi_0 + \int u(t)dt \quad [\text{Wb}; \text{V}, \text{s}] \quad (1.1-1)$$

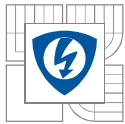
Veličina  $\Psi$  se nazývá spřažený magnetický tok cívky a je to míra interakce cívky s magnetickým polem prostupujícím plochou cívky.  $\Psi_0$  je obecná integrační konstanta a  $u(t)$  je svorkové napětí cívky. Derivací obou stran rovnice podle času vznikne indukční zákon v diferenciálním tvaru:

$$u(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (1.1-2)$$

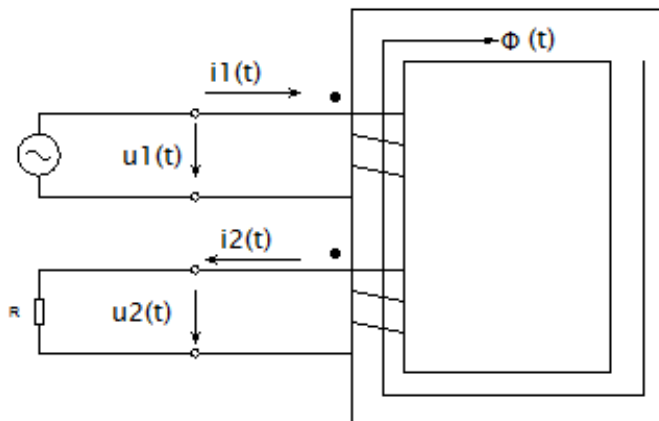
$$u(t) = - \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (1.1-3)$$

Z těchto dvou rovnic vyplývají dva režimy cívky. Rovnice (1.1-2) je režim spotřebičový a rovnice (1.1-3) je režim zdrojový. Volba znaménka je dána dohodou, který režim se považuje za základní. U spotřebičového režimu je orientace svorkového napětí  $u(t)$  a proudu  $i(t)$  souhlasná. Cívka je napájena napětím  $u(t)$  a odebírá proud  $i(t)$  a chová se tedy jako spotřebič, jež odebírá elektrickou energii. Takto odebíranou energii přeměňuje na energii magnetického pole. Zdrojový režim je přesně naopak. Orientace napětí a proudu není souhlasná. Platí tedy rovnice (1.1-3). Cívka zde pracuje jako generátor, tedy zdroj elektrického napětí  $u(t)$ . To je způsobeno tím, že cívka je vložena do proměnného magnetického pole  $B(t)$  a na jejích svorkách se indukují napětí  $u(t)$  [3][4][5].





Takhle pracuje transformátor. Primární vinutí pracuje ve spotřebičovém režimu a sekundární v režimu zdrojovém. Princip je zobrazen na Obr. 1.1 [5].



Obr. 1.1 Princip funkce transformátoru [5].

Velikost spřaženého toku lze vyjádřit jako skalární součin vektoru plochy  $S$  a vektoru magnetické indukce  $B$ :

$$\Psi = B \cdot S \cdot \cos\alpha = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad [\text{Wb}; \text{T}, \text{m}^2] \quad (1.1-4)$$

kde  $\cos\alpha$  je úhel mezi vektorem magnetické indukce a plochy. V případě transformátoru je cívka navinutá na železné jádro. Velikost toku bude tedy v podobě plošného integrálu přes plochu  $S$  (rozptylový tok je zde zanedbán kvůli jeho malé hodnotě):

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \oint \vec{B}_{FE} \cdot \overline{dS_{FEi}} \quad (1.1-5)$$

kde suma značí počet závitů. V literatuře [5] bylo řešením integrálu (1.1-1) přes různé tvary ploch a počtu závitů dokázána věta:

„Velikost plošného integrálu  $\Psi = \oint \vec{B} \cdot \overline{dS}$  přes plochu  $S$  je nezávislá na tvaru plochy  $S$ , ovšem při zachování konstantního tvaru hraniční křivky  $l$ .“

Tato věta platí samozřejmě i v případě, že cívka je navinutá na železné jádro. Věta velice zjednodušuje výpočty. Řešením rovnice (1.1-4) pomocí věty o nezávislosti na tvaru ploše se dostane k následujícím vztahům:

$$\Psi = N \cdot \Phi \quad \text{resp.} \quad \Psi(t) = N \cdot \Phi(t) \quad (1.1-6)$$

$$\Phi = B_{FE} \cdot S_{FE} \quad \text{resp.} \quad \Phi(t) = B_{FE}(t) \cdot S_{FE} \quad (1.1-7)$$

$\Phi$  značí velikost magnetického toku uvnitř železného jádra a  $N$  počet závitů cívky [5].

### 1.1.2 Konstrukce a provedení

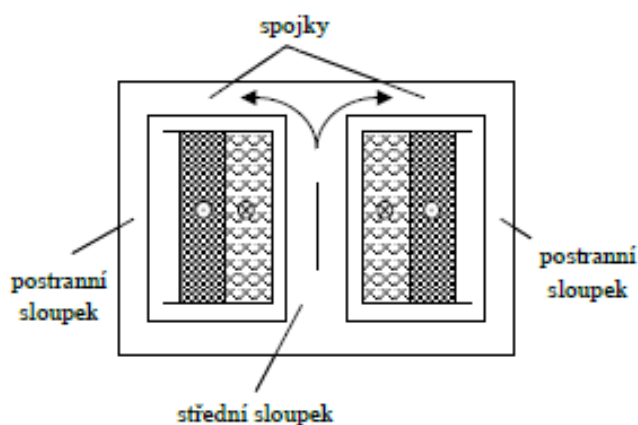
Magnetický obvod transformátorů je složen ze speciálních plechů pro elektrotechniku o tloušťce 0,35 mm, 0,5 nebo 0,28 mm. Tyto plechy jsou mezi sebou odizolovány lakem nebo u



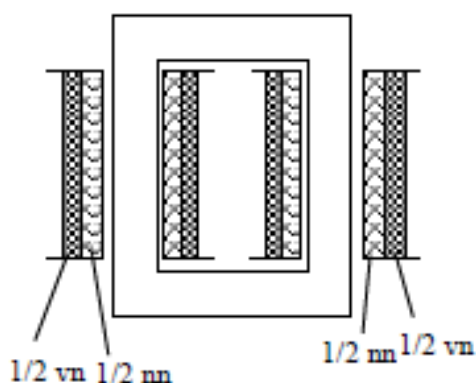
starších modelů papírem. Takto složenými plechy se omezí ztráty vířivými proudy. Používají se také plechy tzv. orientované, které se válcují za studena. Mají v podstatě menší hysterzeční ztráty. Transformátory dělíme podle konstrukce magnetického pole na plášťové a jádrové [3][4].

Plášťové se používají nejčastěji u jednofázových transformátorů. Taková konstrukce je vyobrazena na Obr. 1.2. Střední sloupek má největší průřez, zatímco postranní sloupky mají poloviční. Na střední sloupek je umístěno vinutí a magnetický tok se souměrně rozděluje do spojek a do postranních sloupků. Výhodou je jednoduché navíjení, menší rozptyly, dobré rozdělení magnetického toku a snadné upevnění svazku jádra [3][4].

U jádrové konstrukce jsou vinutí rovnoměrně rozděleny na všechna jádra. Konstrukce je vyobrazena na Obr. 1.3 [3][4].



Obr. 1.2 Plášťový transformátor [3].



Obr. 1.3 Jádrový transformátor [3].

Transformátorové jádra se rozdělují podle tvaru plechů na plechy EI, plechy M a toroidy. U plechů tvaru EI a M se používá provedení plášťové, avšak nejčastěji se používají tvary EI. Takové jádra se používají pro jednofázové transformátory menší výkonů. Pokryjí přibližně 10 VA až 1,5 kVA [3][4].



Toroidní plechy jsou vyráběny z anizotropní křemíkové oceli válcované za studena. Jejich tloušťka obvykle bývá 0,5 mm, 0,35 mm a nestandardně 0,28 mm a 0,20 mm. Takový tvar plechů se používá při jádrovém provedení [5]. Toroidní jádro lze vidět na Obr. 1.4.



Obr. 1.4 Toroidní jádro.

Vinutí transformátorů je většinou tvořeno měděnými nebo hliníkovými vodiči. Průřezy těchto vodičů bývají kruhového, čtvercového nebo obdélníkové tvaru. To závisí na použití transformátoru, tedy na požadovaném výkonu transformátoru. Vinutí musí být tepelně na dimenzována a mechanicky odolná vůči silám způsobenými zkratovými proudy [3][4][5].

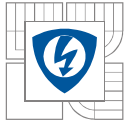
## 1.2 Návrh transformátorů obecně

Postup při návrhu transformátorů by měl vést k co nejmenšímu možnému celkovému objemu, hmotnosti nebo ceně [5]. Dle literatury [5] se postup skládá z následujících kroků:

1. Na základě požadovaného výkonu transformátoru určit velikost a materiál jádra
2. Podle zvolené magnetické indukce železa  $B_{max}$  vypočítat počet primárních závitů.
3. Vypočítat počet sekundárních vodičů na základě požadovaného výstupního napětí.
4. S ohledem na proudovou hustotu určit průřez vodičů tak, aby povrch vinutí mohl vychladit Joulovy ztráty při zvoleném oteplení  $\Delta T$ .
5. Zkontrolovat oteplení železa, které je dáno velikostí hysterezních a vířivých ztrát.

### 1.2.1 Určení počtu závitů primárního vinutí

K určení počtu primárních závitů  $N_I$  je za potřebí znát hodnotu primárního efektivního napětí  $U_{Ief}$ , velikost magnetické indukce železa  $B_{max}$ , frekvenci  $f$ , průřez jádra  $S_j$  a činitel plnění železa  $k_{p,FE}$ . Při návrhu transformátoru je velikost primárního napětí známá, stejně tak i frekvence. Hodnotu magnetické indukce a činitel plnění železa se určí ze zvoleného materiálu jádra [5]. Činitel plnění železa mívá hodnotu 0,92 až 0,96 v závislosti na tloušťce plechů a velikosti jádra. Počet primárních závitů se vypočte pomocí rovnice:



$$N_1 = \frac{U_{1ef}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_{max} \cdot S_j \cdot k_{p,Fe}} = \frac{U_{1ef}}{4,44 \cdot f \cdot B_{max} \cdot S_j \cdot k_{p,Fe}} \quad [-; \text{V, Hz, T, m}^2, -] \quad (1.2-1)[5]$$

Průřez jádra závisí na tvaru použitého jádra. Univerzální rovnicí, která není závislá na tvaru jádra, lze vypočítat elektromagnetickou velikost jádra:

$$S_j \cdot S_o = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{S}{k_{p,Fe} \cdot k_{p,Cu} \cdot f \cdot B_{max} \cdot \sigma} \quad [\text{m}^4; \text{VA, Hz, T, A} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.2-2)[5]$$

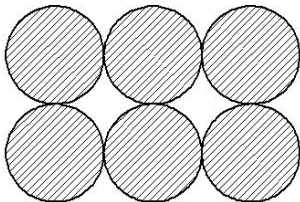
kde  $S_o$  [ $\text{m}^2$ ] je plocha okna a  $\sigma$  [ $\text{A}/\text{m}^2$ ] proudová hustota.

Proudová hustota  $\sigma$  závisí na velikosti vinutí. Obvykle nabývá hodnot  $3 \text{ A}/\text{mm}^2$ . Při zvyšování vinutí je nutné proudovou hustotu snižovat na hodnotu 2 až  $1 \text{ A}/\text{mm}^2$ . Naopak při zmenšování vinutí proudová hustota se může zvyšovat až na  $5 \text{ A}/\text{mm}^2$  [5].

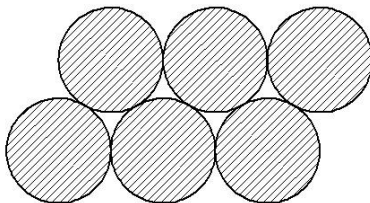
Činitel plnění vinutí  $k_{p,Cu}$  závisí na velikosti vinutí a způsobu, jakým je vinutí navinuto. U transformátorů lze v praxi dosáhnout hodnot 0,3 až 0,4. Činitel plnění vinutí je součinem dalších tří činitelů, a to činitele tvaru  $k_t$ , činitele izolace  $k_i$  a přídavného činitele  $k_{př}$ :

$$k_{p,Cu} = k_t \cdot k_i \cdot k_{př} \quad (1.2-3)[5]$$

Činitel tvaru závisí na způsobu uložení vodičů ve vrstvách vinutí a také na průřezu vodiče. Pro vodiče kruhového průřezu jsou dva způsoby uložení. U uložení podle Obr. 1.5 jsou sousední vrstvy vinuty v opačném směru. Při tomto uložení má činitel tvaru hodnotu  $k_t=0,78$ . Při uložení podle Obr. 1.6 jsou sousední vrstvy vinuty ve stejném směru. V takovém případě je  $k_t=0,90$  [5].



Obr. 1.5 Vrstvy jsou vinuty v opačném směru [5].

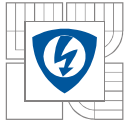


Obr. 1.6 Vrstvy jsou vinuty ve stejném směru [5].

Činitel izolace je poměr průměru vodiče  $d_{Cu}$  k průměru vodiče s izolací  $d$ :

$$k_i = \frac{d_{Cu}^2}{d^2} \quad [-; \text{m, m}] \quad (1.2-4)[5]$$

Přídavný činitel (technologický) závisí na tloušťce vodiče, velikosti vinutí, počtu závitů, počtu vinutí a také na zručnosti pracovníka. Pro lakované měděné vodiče se přídavný činitel určuje ze



závislosti tohoto činitele na průměru vodiče [5]. Taková závislost je vyobrazena v literatuře [5] na Obr. 9.1.3-1 .

### 1.2.2 Magnetizační proud

Magnetizační proud se vypočítá pomocí rovnice:

$$I_{\mu ef} = \frac{\pi \cdot f \cdot B_{max}^2 \cdot S_j \cdot k_{p,FE} \cdot l_{FE}}{U_{1ef} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rFE}} \cdot \left( 1 + \frac{\mu_{rFE} \cdot l_v}{l_{FE}} \right) [\text{A}; \text{Hz}, \text{T}, \text{m}^2, \text{m}, \text{V}, \text{m}] \quad (1.2-5)[5]$$

Lze vidět, že k výpočtu je potřeba délku magnetické siločáry v železe  $l_{Fe}$ , hodnotu permeability železa  $\mu_{Fe}$  a délku vzduchové mezery  $l_v$ . Délka magnetické siločáry v železe je dána tvarem jádra a jeho velikostí. Je to v podstatě obvod vedoucí prostředkem jádra. Permeabilita železa se pohybuje od 300 až do 10 000 v závislosti na magnetické indukci [5]. Při pozdějším návrhu zadaného transformátoru se se vzduchovou mezerou nebude počítat. Pro výpočet magnetizačního proudu bude tedy použit vzorec:

$$I_{\mu ef} = \frac{\pi \cdot f \cdot B_{max}^2 \cdot S_j \cdot k_{p,FE} \cdot l_{FE}}{U_{1ef} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rFE}} \quad (1.2-6)$$

Vztah (1.2-5) a (1.2-6) platí pouze tehdy, je-li magnetický obvod lineární [5].

Magnetizační proud je velmi malý, vzhledem k proudu zátěže zanedbatelný. To znamená, že při dimenzování vodičů se tento proud nebere v úvahu. Je však nutný pro výpočet proudu naprázdno, jelikož je to jalová složka proudu naprázdno (magnetizační proud je posunutý o 90° za napětím) [5].

### 1.2.3 Ztráty, účinnost a proud naprázdno

Jak již bylo zmíněno výše, celkový proud naprázdno se skládá z magnetizačního proudu  $I_\mu$  a činné složky proudu naprázdno  $I_{0c}$ . Činná složka kryje všechny ztráty naprázdno, tzn. vířivé ztráty v železe a hysterezní ztráty. Ztráty ve vinutí se zde zanedbávají [5].

Pro výpočet ztrát naprázdno je zapotřebí znát rozměry jádra anebo alespoň jeho hmotnost. Dále je nutné znát ztrátové číslo  $Z$  železa [ $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]. Ztráty naprázdno se tedy vypočítají podle vzorce:

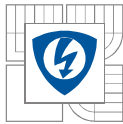
$$P_{FE} = Z \cdot m_{FE} [\text{W}; \text{W} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{kg}] \quad (1.2-7)$$

Po vyjádření hmotnosti pomocí měrné hmotnosti železa  $\gamma_{Fe}$ , objemu jádra  $V_j$  a činitele plnění železa jsou měrné ztráty naprázdno dány:

$$P_{FE} = Z \cdot \gamma_{Fe} \cdot V_j \cdot k_{p,Fe} [\text{W}; \text{W} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, \text{m}^3] \quad (1.2-8)$$

Ztráty vířivé a hysterezní jsou závislé pouze na velikosti primárního napětí. Z toho vyplývá, že ztráty naprázdno nejsou vůbec závislé na proudu. Na proudu jsou závislé ztráty ve vinutí [5].

Účinnost transformátoru lze určit podle rovnice:



$$\eta = \frac{P_{2\check{c}}}{P_{2\check{c}} + P_{Fe} + P_{Cu}} \quad [-; W, W, W, W] \quad (1.2-9)$$

kde  $P_{2\check{c}}$  je činný výkon zátěže [5].

Činný proud naprázdno lze tedy vypočítat pomocí rovnice:

$$I_{0\check{c}} = \frac{P_{Fe}}{U_{1ef}} \quad [A; W, V] \quad (1.2-10)[5]$$

Celkový proud naprázdno se vypočítá jako velikost komplexního čísla, kde činná složka je tedy činný proud naprázdno a jako jalová magnetizační proud:

$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{\mu ef}^2} \quad [A; A, A] \quad (1.2-11)[5]$$

K výpočtu Joulových ztrát ve vinutí  $P_{Cu}$  je zapotřebí znát odpor vodiče  $R$ , ze kterého se skládá vinutí. Odpor  $R$  se vypočítá jednak pomocí geometrických rozměrů vodiče, jako jsou jeho délka  $l$  a průřez  $S_{Cu}$ , a měrný odpor mědi  $\rho_{Cu}$ . Vzorec je ve tvaru:

$$R = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{S_{Cu}} \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}, \text{mm}^2] \quad (1.2-12)$$

Ztráty ve vinutí budou tedy:

$$P_{Cu} = R \cdot I_{1ef}^2 \quad [W; \Omega, A] \quad (1.2-13)$$

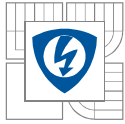
Odtud tedy plyne předchozí tvrzení, že ztráty ve vinutí jsou závislé na procházejícím proudu, dokonce na jeho kvadrátu [5].

#### 1.2.4 Průřez vodiče

Vodiče musí být správně na dimenzovány, aby snesly proudovou hustotu a oteplení. Při návrhu zadaného transformátoru se bude vycházet ze vzorce:

$$S_{Cu} = \frac{I_{1ef}}{\sigma} \quad [\text{mm}^2; A, A/\text{mm}^2] \quad (1.2-14)[5]$$

Pro průřez vodiče sekundárního vinutí je použit stejný vzorec, akorát místo primárního proudu je proud sekundární [5].



## 2 NÁVRH TRANSFORMÁTORU

Jak již je zmíněno v úvodu, navrhovaný transformátor bude mít konstrukci magnetického obvodu ve tvaru toroidu. Postup při návrhu transformátoru bude o trochu jiný, než který je zmíněn v kapitole 1.2, jelikož už je zadán počet primárních a sekundárních závitů.

### 2.1 Zadané a základní parametry

Ze začátku je nutno si nadefinovat všechny zadané parametry:

Vstupní napětí (primární napětí)  $U_{1ef} = 400$  V  
Proud na sekundární straně (výstupní proud)  $I_2 = 6,3$  kA  
Počet primárních závitů  $N_1 = 720$  závitů  
Počet sekundárních závitů  $N_2 = 1$  závit  
Frekvence  $f = 50$  Hz  
Jalový výkon  $Q = 5$  VAC

Transformátor nebude mít sekundární vinutí namotáno na jádře, ale bude formou přípojníc vedených oknem jádra. Proto je počet závitů  $N_2 = 1$ .

Lze vidět, že chybí vstupní proud a výstupní napětí. Tyto dva parametry se dají vypočítat pomocí převodu transformátoru  $p$ , pro který platí vzorec:

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad [-; -, -, V, V, A, A] \quad (2.1-1)$$

$U_2$  a  $I_1$  jsou neznámé, převod se tedy vypočítá pomocí závitů:

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{720}{1} = 720 \quad (2.1-2)$$

Výstupní napětí bude tedy podle rovnice (2.1-1) :

$$U_2 = \frac{U_1}{p} = \frac{400}{720} = 0,56 \text{ V} \quad (2.1-3)$$

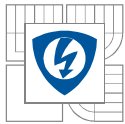
Vstupní proud:

$$I_1 = \frac{I_2}{p} = \frac{6300}{720} = 8,8 \text{ A} \quad (2.1-4)$$

Z těchto hodnot se dá dále vypočítat, jaký bude zdánlivý výkon transformátoru  $S$  [VA]. Je úplně jedno, jaký proud a napětí použijeme, jestli napětí a proud na primární straně nebo na sekundární straně transformátoru, jelikož se dojde ke stejnému výsledku [3]. Zdánlivý výkon bude tedy:

$$S = U_2 \cdot I_2 = 0,56 \cdot 6300 = 3528 \text{ VA} \quad (2.1-5)$$

Rovnicí (2.1-5) se vypočítal zdánlivý výkon pouze jednoho modulu. Jestliže má být transformátor 9- ti modulový, bude celkový výkon všech modulů 9x větší. Výpočtem tedy vychází, že celkový



zdánlivý výkon bude až 31,752 kVA. Při návrhu se samozřejmě počítá s výkonem vypočítaným podle rovnice (2.1-5).

K výpočtu účinnosti podle rovnice (1.2-9) je nutné znát činný výkon:

$$P_{2\check{c}} = S \cdot \cos \varphi \text{ [W; VA, -]} \quad (2.1-6)$$

Účinník  $\cos \varphi$  je neznámá. Účinník se zjistí ze zadaného jalové výkonu  $Q$ , pro který platí vzorec:

$$Q = S \cdot \sin \varphi \text{ [VAC; VA, -]} \quad (2.1-7)$$

Pro účinník tedy bude platit:

$$\cos \varphi = \cos(\sin^{-1}(\frac{Q}{S})) = \cos(\sin^{-1}(\frac{5}{3528})) = 0,99 \quad (2.1-8)$$

Výsledný činný výkon podle rovnice (2.1-6):

$$P_{2\check{c}} = S \cdot \cos \varphi = 3528 \cdot 0,99 = 3527,99 \text{ W} \quad (2.1-9)$$

Lze vidět, že činný výkon se téměř shoduje se zdánlivým výkonem, jelikož účinník je téměř roven 1. Proto při počítání účinnosti v kapitole 2.7 se uvažuje  $S=P_{2\check{c}}$ .

Pro přehlednost jsou všechny zadané a základní parametry obsaženy v Tabulka 1:

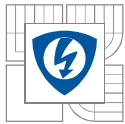
*Tabulka 1 Souhrn parametrů transformátoru.*

Vstupní napětí	$U_1$ [V]	400
Vstupní proud	$I_1$ [A]	8,8
Počet primárních závitů	$N_1$ [-]	720
Výstupní napětí	$U_2$ [V]	0,56
Výstupní proud	$I_2$ [A]	6300
Počet sekundárních závitů	$N_2$ [-]	1
Frekvence	$f$ [Hz]	50
Zdánlivý výkon	$S$ [VA]	3528
Jalový výkon	$Q$ [VAC]	5
Účinník	$\cos \varphi$ [-]	0,99
Činný výkon	$P_{2\check{c}}$ [W]	3528

## 2.2 Volba materiálu jádra, určení permeability

Volba materiálu je velice důležitá, jelikož z materiálu se potom odvíjí další parametry, jako jsou permeabilita, činitel plnění železa, magnetická indukce, ztrátové číslo a hmotnost, které jsou nepostradatelné při výpočtech.

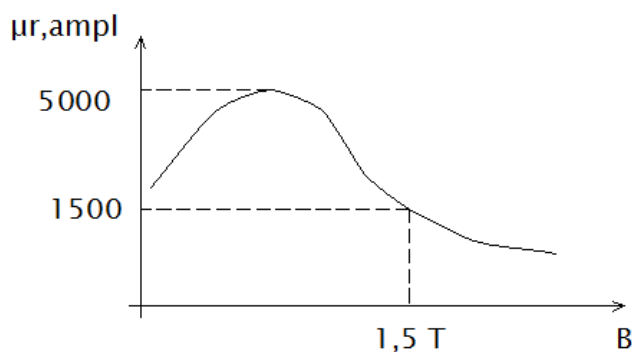




Jako materiál je zvolena křemíková ocel anizotropní válcovaná za studena. Tato ocel byla zvolena, protože je tento materiál určen pro toroidní tvary jader. Používají se taky pro jádra tvaru C. Tyto plechy se označují zkratkou GOSS (Grain Oriented Silicon Steel). Plechy jsou po válcování tepelně zpracovány, aby zůstala jejich anizotropie. Při legování oceli 3 % Si má tento materiál hodnotu měrného elektrického odporu  $0,48 \mu\Omega\text{m}$ . Při návrhu transformátoru je důležitá hodnota permeability tohoto materiálu a činitel plnění železa [5].

Hodnota permeability byla zvolena podle Obr. 6.5.5-2 obsaženým v literatuře [5], kde pro hodnotu magnetické indukce  $B_{max}=1,5 \text{ T}$  (je uvažováno, že tento transformátor bude mít hodnotu maximální magnetické indukce  $1,5 \text{ T}$ ) je hodnota permeability  $\mu_r=1500$ .

Činitel plnění železa  $k_{p,Fe}$  je podle Tab. 6.5.5-1 v literatuře [5] v rozmezí hodnot 0,95 až 0,97. Po dohodě s vedoucím práce je zvolena hodnota 0,95.



Obr. 2.1 Relativní amplitudová permeabilita v závislosti na magnetické indukci u plechů válcovaných za studena tloušťky 0,35 mm. Překresleno podle Obr. 6.5.5-2 v literatuře [5].

## 2.3 Velikost a průřez jádra

Velikost jádra byla navržena za pomoci vedoucího a firmou, která zadaný transformátor bude vyrábět. Vzájemnou domluvou byly stanoveny následující parametry jádra:

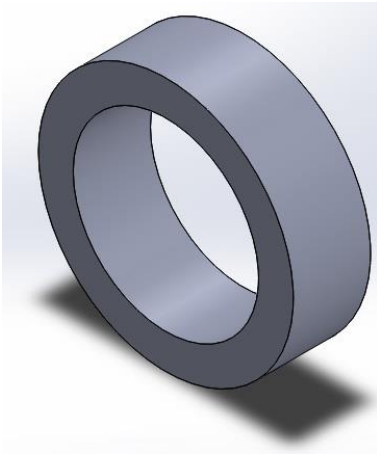
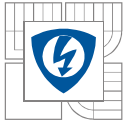
Vnitřní průměr:  $d_1=240 \text{ mm}$

Vnější průměr:  $d_2=330 \text{ mm}$

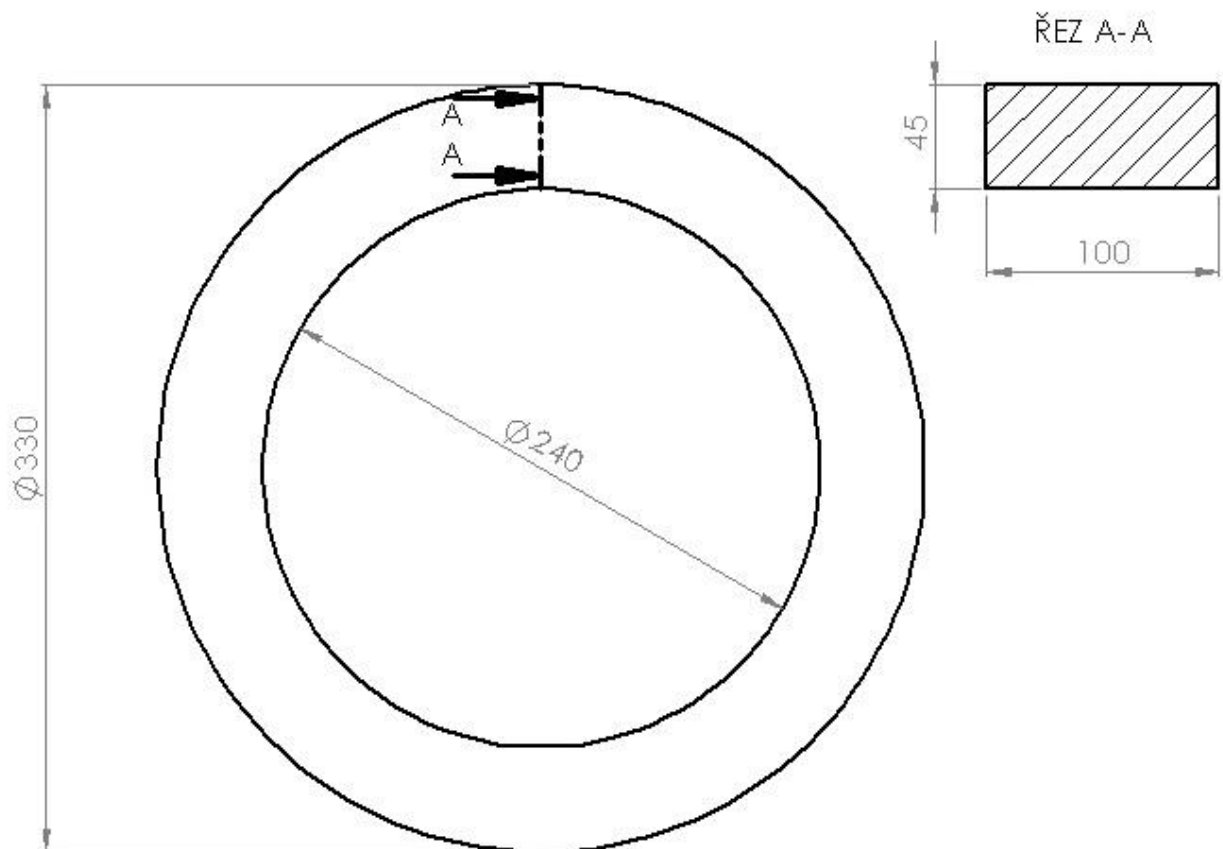
Výška jádra:  $h=100 \text{ mm}$

Při dalším navrhování bude zapotřebí znát průřez jádra  $S_j$ . Hodnoty potřebné pro výpočet jsou na Obr. 2.3 v ŘEZ A-A. Průřez bude tedy:

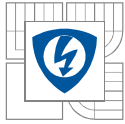
$$S_j = 100 \cdot 45 = 4500 \text{ mm}^2 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (2.3-1)$$



Obr. 2.2 Přibližný model jádra. Povrchově neupravený.



Obr. 2.3 Nákres jádra.



## 2.4 Magnetická indukce

Ve většině případů hodnotu magnetické indukce  $B_{max}$  volí návrhář. V případě této práce se tato hodnota počítá. Bude se vycházet z rovnice (1.2-1), kde její úpravou se vyjádří  $B_{max}$ :

$$B_{max} = \frac{U_{1ef}}{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot S_j \cdot k_{p,Fe}} \text{ [T; V, Hz, -, m}^2, \text{-]} \quad (2.4-1)$$

Dosazením do této rovnice se pak vyjádří hodnota magnetické indukce:

$$B_{max} = \frac{U_{1ef}}{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot S_j \cdot k_{p,Fe}} = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 720 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 0,585 \text{ T} \quad (2.4-2)[5]$$

Taková hodnota je příliš malá a bude zbytečně nevyužité železo. Proto se po domluvě s vedoucím navrholo řešení. Řešení spočívá v tom, že se vinutí rozdělí na polovinu. Budou tedy dvě vinutí o 360-ti závitech. Tyto dvojice vinutí se spolu budou dát propojit na svorkovnici, která je řešena v kapitole 3.4. Transformátor bude tedy moct pracovat ve dvou režimech, jeden při 720-ti závitech a magnetickou indukcí vypočtenou výše, a druhý při 360-ti závitech a tedy dvakrát tak větší magnetickou indukcí 1,16 T. Bylo uvažováno, že hodnota magnetické indukce  $B_{max}$  bude 1,5 T pro 360 závitů a pro 720 závitů 0,7 T. Tyto hodnoty byly získané na základě měření firmou Therma FM, která pro měření použila přístroj Toroidmetr, jež měří magnetickou indukci jader a další parametry, jako jsou intenzita magnetického pole, či amplitudová permeabilita. Nými vypočtené hodnoty vyšly méně, než hodnoty předpokládané. Je tedy značná rezerva pro velikost jádra a nemusí se tedy upravovat rozměry.

## 2.5 Ztráty naprázdno, magnetizační proud a proud naprázdno

Jak je zmíněno v kapitole 1.2.3, k výpočtu ztrát naprázdno je zapotřebí znát ztrátové číslo  $Z$  a hmotnost jádra. Ztrátové číslo je voleno  $1,5 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Váha jádra se vypočítá z objemu jádra  $V_j$ , činitele plnění železa  $k_{p,Fe}$  a měrné hmotnosti zvoleného materiálu  $\gamma_{Fe}$ , kde podle Tab. 6.5.5-1 v literatuře [5] je  $\gamma_{Fe} = 7660 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Pro objem tedy platí:

$$V_j = \left( \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \right) \cdot h = \left( \frac{\pi \cdot 0,330^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,240^2}{4} \right) \cdot 0,100 = 4,029 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.5-1)$$

Hmotnost jádra:

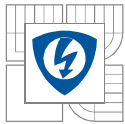
$$m_{Fe} = V_j \cdot \gamma_{Fe} \cdot k_{p,Fe} = 4,029 \cdot 10^{-3} \cdot 7660 \cdot 0,95 = 29,32 \text{ kg} \quad (2.5-2)$$

Ztráty naprázdno podle rovnice (1.2-7):

$$P_{FE} = Z \cdot m_{FE} = 1,5 \cdot 29,32 = 43,98 \text{ W} \quad (2.5-3)$$

Činný proud naprázdno se vypočítá pomocí rovnice (1.2-10):

$$I_{0\check{c}} = \frac{P_{Fe}}{U_{1ef}} = \frac{43,98}{400} = 0,11 \text{ A} \quad (2.5-4)$$



Pro výpočet celkové proudu naprázdno je ještě zapotřebí vypočítat magnetizační proud podle rovnice (1.2-6). K tomu je potřeba znát délku magnetické siločáry  $l_{Fe}$ :

$$l_{Fe} = (d_2 - d_1) \cdot \pi = (0,330 - 0,240) \cdot \pi = 0,283 \text{ m} \quad (2.5-5)$$

Magnetizační proud při  $N=720$  závitů podle rovnice (1.2-6):

$$I_{\mu ef720} = \frac{\pi \cdot f \cdot B_{max}^2 \cdot S_j \cdot k_{p,FE} \cdot l_{FE}}{U_{1ef} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rFE}} = \frac{\pi \cdot 50 \cdot 0,585^2 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \cdot 0,283}{400 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1500} \quad (2.5-6)$$
$$= 0,086 \text{ A}$$

Pro  $N=360$  závitů bude magnetizační proud 4x větší, než pro 720 závitů. Plyne to z kvadrátu magnetické indukce  $B_{max}$ :

$$I_{\mu ef360} = \frac{\pi \cdot f \cdot B_{max}^2 \cdot S_j \cdot k_{p,FE} \cdot l_{FE}}{U_{1ef} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rFE}} = \frac{\pi \cdot 50 \cdot 1,18^2 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 \cdot 0,283}{400 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1500} \quad (2.5-7)$$
$$= 0,34 \text{ A}$$

Nyní lze vypočítat celkový proud naprázdno  $I_{0360}$  pro 360 závitů a  $I_{0720}$  pro 720 závitů podle rovnice (1.2-11):

$$I_{0360} = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{\mu ef360}^2} = \sqrt{0,11^2 + 0,34^2} = 0,36 \text{ A} \quad (2.5-8)$$

$$I_{0720} = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{\mu ef720}^2} = \sqrt{0,11^2 + 0,086^2} = 0,14 \text{ A} \quad (2.5-9)$$

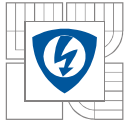
## 2.6 Vinutí

Průřez vodiče se určí podle rovnice (1.2-14). Proudová hustota  $\sigma$  je zvolena  $4 \text{ A} \cdot \text{mm}^2$ . Průřez potom tedy bude (pozn. v dalších výpočtech se bude průřez označovat jako  $S_{Cu}$  bez indexu 1 nebo 2, jelikož se počítá jenom s primárním vinutím):

$$S_{Cu} = \frac{I_{1ef}}{\sigma} = \frac{8,8}{4} = 2,2 \text{ mm}^2 \quad (2.6-1)$$

Z řady jmenovitých hodnot průřez se najde nejbližší vyšší hodnota. To odpovídá hodnotě  $2,5 \text{ mm}^2$ . Vinutí bude tedy měděný drát o průřezu  $S_{Cu} = 2,5 \text{ mm}^2$ .

Ztráty ve vinutí se vypočítají pomocí vzorce (1.2-13). V této chvíli ale není znám odpor vodiče. Pro výpočet odporu podle vzorce (1.2-12) je zapotřebí znát délku  $l$ . Podle Obr. 2.3 ŘEZ A-A lze zjistit, kolik bude mít délku jeden závit. Je známo, že celkový počet závitů je 720. Délka jednoho závitu se vynásobí počtem závitů a dostane se tak celková délka vodiče:



$$l_{720} = (0,100 + 0,045 + 0,100 + 0,045) \cdot 720 = 208,8 \text{ m} \quad (2.6-2)$$

Nyní se již zná délka vodiče a může se vypočítat odpor  $R_{720}$  pro 720 závitů:

$$R_{720} = \rho_{Cu,20} \cdot \frac{l_{720}}{S_{Cu}} = 0,0178 \cdot \frac{208,8}{2,5} = 1,487 \Omega \quad (2.6-3)$$

Hodnota  $\rho_{Cu,20}$  je pro teplotu 20°C a je zvolena z literatury [5]. Pro 360 závitů bude délka poloviční a z toho vyplývá, že i odpor bude poloviční. Pro 360 závitů bude tedy délka  $l_{360} = 104,4 \text{ m}$  a odpor  $R_{360} = 0,74 \Omega$ .

Znají se již všechny hodnoty potřebné pro výpočet ztrát ve vinutí:

$$P_{Cu720} = R_{720} \cdot I_{1ef}^2 = 1,487 \cdot 8,8^2 = 115,15 \text{ W} \quad (2.6-4)$$

$$P_{Cu360} = R_{360} \cdot I_{1ef}^2 = 0,74 \cdot 8,8^2 = 57,31 \text{ W} \quad (2.6-5)$$

Celkovou váhu mědi lze vypočítat ze vztahu:

$$m_{Cu} = \rho \cdot V \text{ [kg; kg}\cdot\text{m}^{-3}, \text{m}^{-3}] \quad (2.6-6)$$

Kde  $\rho$  je měrná hmotnost mědi a  $V$  je objem vodiče. Pro objem měděného drátu platí vztah:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot l_{720} \text{ [m}^{-3}; \text{m, m}] \quad (2.6-7)$$

kde  $r$  je poloměr měděného drátu a  $l$  délka drátu. Poloměr se dá zjistit ze vztahu pro výpočet průřezu vodiče z geometrických rozměrů. Poloměr měděného drátu bude:

$$r = \sqrt{\frac{S_{Cu}}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,5}{\pi}} = 0,89 \text{ mm} = 0,89 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (2.6-8)$$

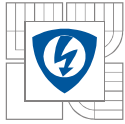
Měrná hmotnost mědi má hodnotu  $\rho = 8960 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  [6]. Nyní lze vypočítat váhu mědi:

$$m_{Cu} = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l_{720} = 8960 \cdot \pi \cdot (0,89 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 208,8 = 4,66 \text{ kg} \quad (2.6-9)$$

## 2.7 Účinnost

Jestliže se znají všechny ztráty, lze vypočítat účinnost transformátoru podle rovnice (1.2-9). Jak je zmíněno v kapitole 2.1 bude se předpokládat, že  $P_{2\epsilon} = S$ . Dále se bude předpokládat, že transformátor pracuje při 720 závitech:

$$\eta = \frac{S}{S + P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{3528}{3528 + 43,98 + 115,15} = 95,68 \% \quad (2.7-1)$$



Součet ztrát naprázdno a ztrát ve vinutí jsou celkové ztráty  $\Delta P$  [W], které vzniknou na transformátoru:

$$\Delta P = P_{Fe} + P_{Cu} = 43,98 + 115,15 = 159,13 \text{ W} \quad (2.7-2)$$

## 2.8 Oteplení

Úkolem této kapitoly je vypočítat odpor vinutí po oteplení. Bude se předpokládat, že maximální dovolené oteplení je  $\Delta T = 60$  K a teplota okolí  $\theta_0 = 40^\circ\text{C}$ . Z toho vyplývá, že teplota po oteplení 60 K je  $\theta = 100^\circ\text{C}$ .

Měrný odpor  $\rho_{Cu}$  je hodnota závislá na teplotě. Pro teplotu okolí  $40^\circ\text{C}$  je měrný odpor roven:

$$\begin{aligned} \rho_{\theta_0} &= \left(1 + \frac{\theta_0 - 20}{234,5 + 20}\right) \cdot \rho_{Cu,20} = \left(1 + \frac{40 - 20}{234,5 + 20}\right) \cdot 1,78 \cdot 10^{-8} \\ &= 1,92 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (2.8-1)$$

Nyní měrný odpor pro  $100^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} \rho_{\theta} &= \left(1 + \frac{\theta - \theta_0}{234,5 + \theta_0}\right) \cdot \rho_{Cu,\theta_0} = \left(1 + \frac{100 - 40}{234,5 + 40}\right) \cdot 1,92 \cdot 10^{-8} \\ &= 2,34 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (2.8-2)$$

Odpor vinutí při  $100^\circ\text{C}$ :

$$R_{760,100} = \rho_{Cu,\theta} \cdot \frac{l_{720}}{S_{Cu}} = 0,0234 \cdot \frac{208,8}{2,5} = 1,95 \Omega \quad (2.8-3)$$

Z rovnice pro výpočet ztrát ve vinutí (1.2-13) lze vidět, že při zvýšení odporu se zvýší i ztráty. Odpor se zvýšil o 31,14 % a z toho vyplývá, že při zvýšení teploty o  $60^\circ\text{C}$  ( $=60$  K) se ztráty také zvýší o 31,14 %. Při teplotě  $100^\circ\text{C}$  ztráty ve vinutí tedy budou  $P_{Cu720} = 151$  W.

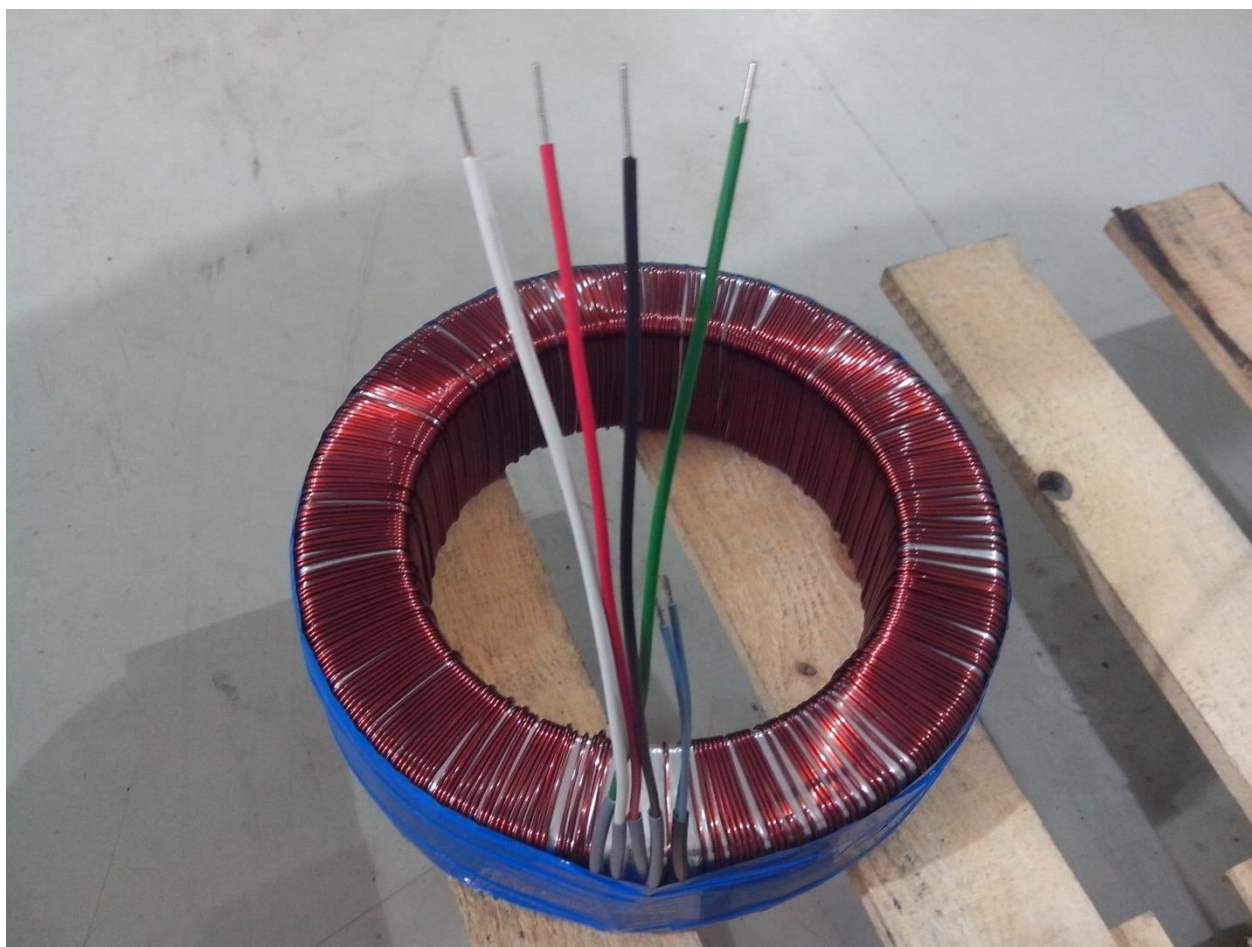


## 3 NÁVRH MECHANICKÉHO ŘEŠENÍ

Tato kapitola se bude zabývat vzhledem, návrhem a konstrukcí transformátoru z hlediska jeho mechanických a estetických částí. Mezi tyto části patří například jádro, primární a sekundární vinutí, návrh formy pro zalévání do epoxidu, následné zalití a finální úpravy transformátoru. Návrh zde bude řešen pomocí programu SolidWorks, kde se vytvoří předběžné modely, jak by měly jednotlivé části vypadat. Poslední podkapitola je zaměřena na proces zalití transformátoru do epoxidu.

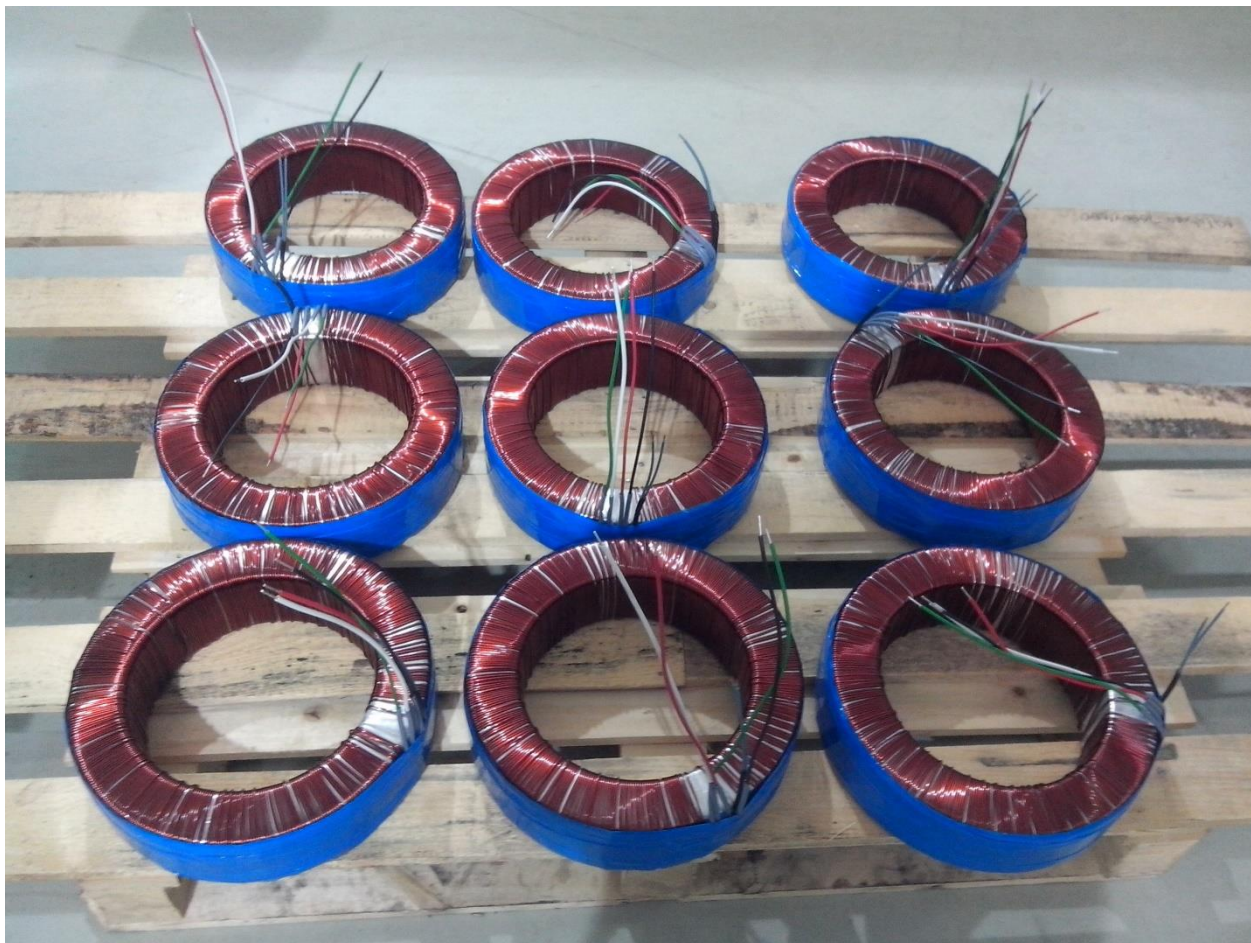
### 3.1 Vzhled jádra s vinutím

Velikost jádra je řešena v kapitole 2.3. Jak jádro vypadá je vidět na obrázku níže.



*Obr. 3.1 Hotové jádro s vinutím a izolací.*

Jak lze vidět na předchozím obrázku, vinutí transformátoru je rozloženo po celé délce jádra. Jsou celkem tedy čtyři vodiče, jedna dvojice pro jedno vinutí. Lze si také všimnout dvou kratších šedých vodičů. Ty slouží pro tepelnou pojistku, která je řešena v dalších kapitolách. Mezi jádrem a vinutím je PVC izolace (viz Obr. 3.1 modrá fólie) o tloušťce 0,4 mm.



Obr. 3.2 Všech devět transformátorů.

### 3.2 Primární strana

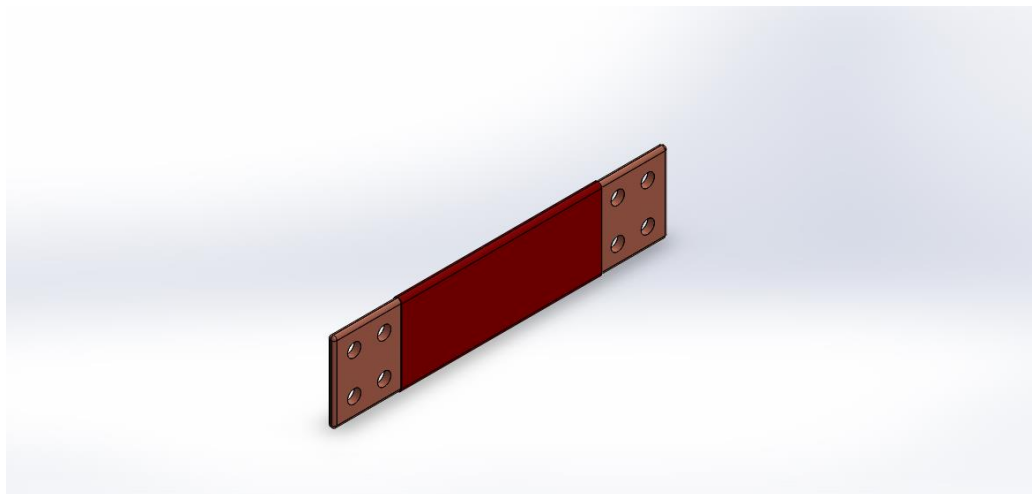
Primární strana transformátoru bude rozdělena na dvojici vinutí podle kapitoly 2.4. Každé bude mít 360 závitů. Vinutí je rozptýleno po celém jádře.

Vinutí bude tvořeno měděným drátem o průřezu  $2,5 \text{ mm}^2$ , který byl vypočten v kapitole 2.6 rovnicí (2.6-1). Na vodič bude navlečena 1 mm široká PVC izolace, která vydrží teplotu až  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Celková váha mědi bude podle rovnice (2.6-9) 4,66 kg. Na jádře a mezi vrstvami vinutí bude také izolace PVC, ale o tloušťce 0,4 mm. Napájení primární strany bude řešeno až v dalších kapitolách.

### 3.3 Sekundární strana

Při výpočtech se uvažoval počet sekundárních závitů jako 1 závit. Sekundární vinutí totiž nebude navlečeno na jádře transformátoru, ale bude formou šesti přípojnic, které povedou oknem transformátoru. Přípojnice budou mít rozměry  $120 \times 10 \text{ mm}$ . Mezi sebou budou vzdáleny 10 mm. Příklad takové přípojnice je na Obr. 3.3 ( na obrázku je přípojnice dlouhá 500 mm, toto není pevně daný rozměr, který musí být použit). Přípojnice o takovém průřezu by měla vydržet přibližně až 3 300 A, dvojitá až 5 700 A [7].

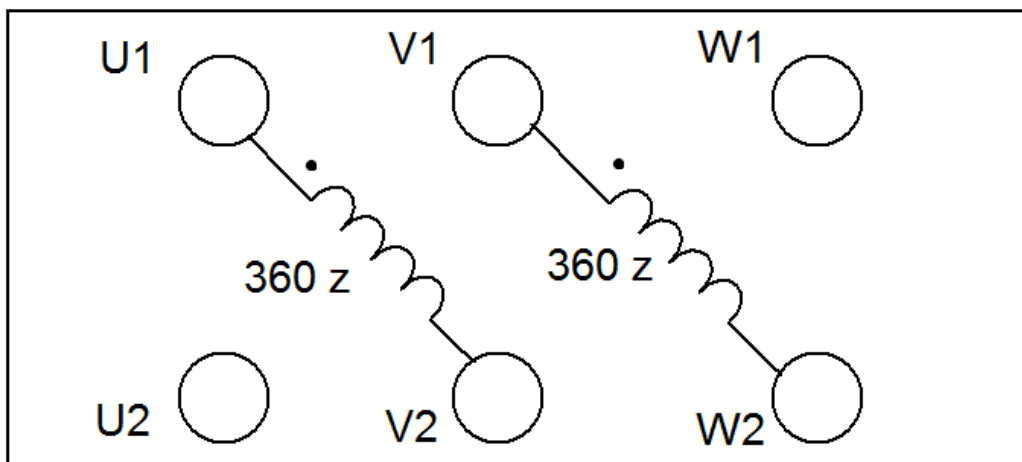




Obr. 3.3 Přípojnice 120x10x500

### 3.4 Svorkovnice

Svorkovnice bude řešena jako u asynchronního motoru: celkem 6 svorek, v řadě po třech nad sebou. Jak je zmíněno v predešlých kapitolách, bude sloužit k přepínání mezi počtem závitů.



Obr. 3.4 Svorkovnice

Na svorku U1 je přiváděno primární napětí. Mezi svorkami U1-V2 a V1-W2 je připojeno jedno vinutí o 360-ti závitěch. Jestliže se požaduje 720 závitů, tak se svorky V1 a V2 propojí. Svorky W1 a U2 budou sloužit pro tepelnou pojistku.

Příklad použité svorkovnice je na Obr. 3.5. Tato svorkovnice je na 8 A a je převzata z asynchronního motoru (značení svorek je jiné než na Obr. 3.4, vrchní svorky jsou značeny příponou 2 a spodní 1)



Obr. 3.5 Příklad svorkovnice pro 8 A.

### 3.5 Chlazení – epoxid, měření teploty, tepelná pojistka, formy pro zalévání, mechanické dodatky

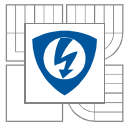
Jak již bylo zmíněno v Úvodu, transformátor nebude chlazen vnějším chlazením, jako je například ventilátor či olej, ale bude zalit do epoxidové pryskyřice.

Epoxidová pryskyřice je reaktoplast a patří do skupiny organických makromolekulárních látek. V elektrotechnickém průmyslu se používají pro své charakteristické vlastnosti, mezi něž patří elektroizolační a chemické vlastnosti v širokém rozsahu teplot. Používají se celkem dva typy epoxidové pryskyřice, a to Rhenatech a Votastat. Rhenatech je základní zalévací pryskyřicí o bílošedé barvě. Používá se pro transformátory, cívky a svorkovnice. V tvrdém stavu má velmi dobré mechanické vlastnosti. Votastat má také dobré vlastnosti a vytvrzuje se v rozmezí teplot 160 až 200 °C. Používá se u elektrických motorů [8].

Při zalévání se do epoxidové pryskyřice smíchává tvrdidlo. Po vytvrzení se mění na pevnou hmotu a získává nové vlastnosti, jako je elasticita, mechanická pevnost či tepelná odolnost. Tyto vlastnosti závisí také na typu tvrdidla, které bylo při procesu použito [8].

Problémem při tuhnutí epoxidové pryskyřice je, že se mechanicky rozpíná. Z toho vyplývá, že transformátor bude velice mechanicky namáhán a mohlo by se poškodit vinutí či izolace. Transformátor se tedy obalí do 3mm vrstvy neoprenu. Neopren by měl tlumit případné tlačení epoxidové vrstvy na transformátor.

Pro zalití navrhovaného transformátoru je použita epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 531 s epoxidovým hmotnostním ekvivalentem 180 g/mol a tvrdidlo CHS P11 s aminovým číslem 1500 mgKOH/g [10]. Epoxidový hmotnostní ekvivalent a aminové číslo tvrdidla je nutné znát pro poměr, s jakým se budou dvě hmoty smíchávat. Vydělením aminového čísla epoxidovým hmotnostním ekvivalentem se získá daný poměr [9]. Poměr epoxidové pryskyřice a tvrdidla je tedy

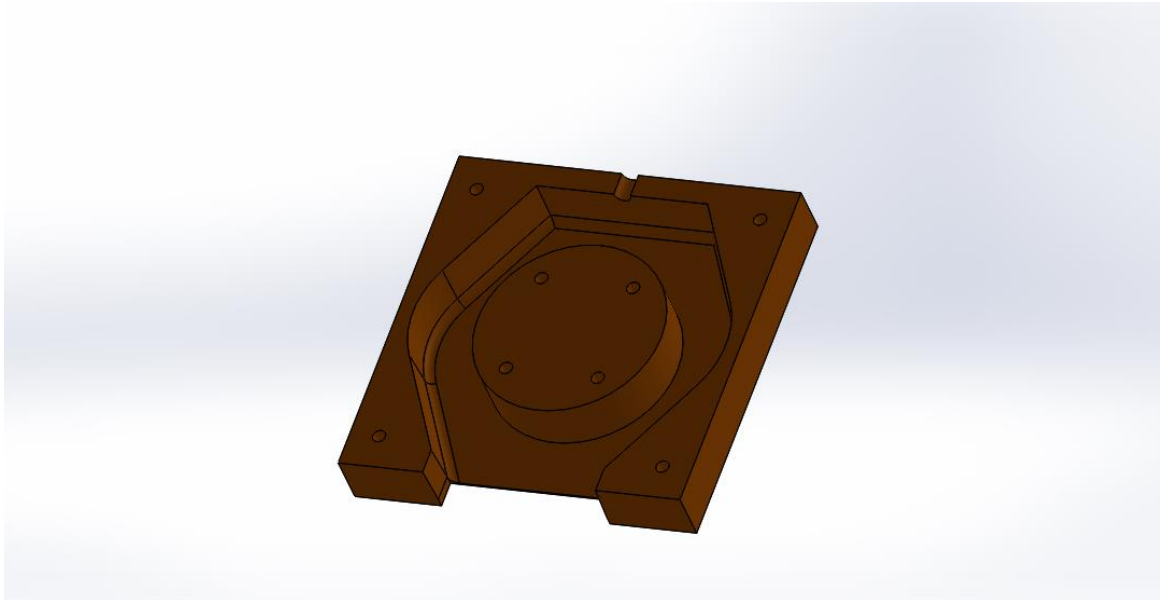


1500:180, po vykrácení tedy 100:12. Do smíchané kompozice je taky nutné přimíchat i plnivo. Jako plnivo je použito Füller s velikosti zrn 0,1-0,3. Plnivo bude přidáno v poměru 2,5 kg na 1 kg epoxidu [10].

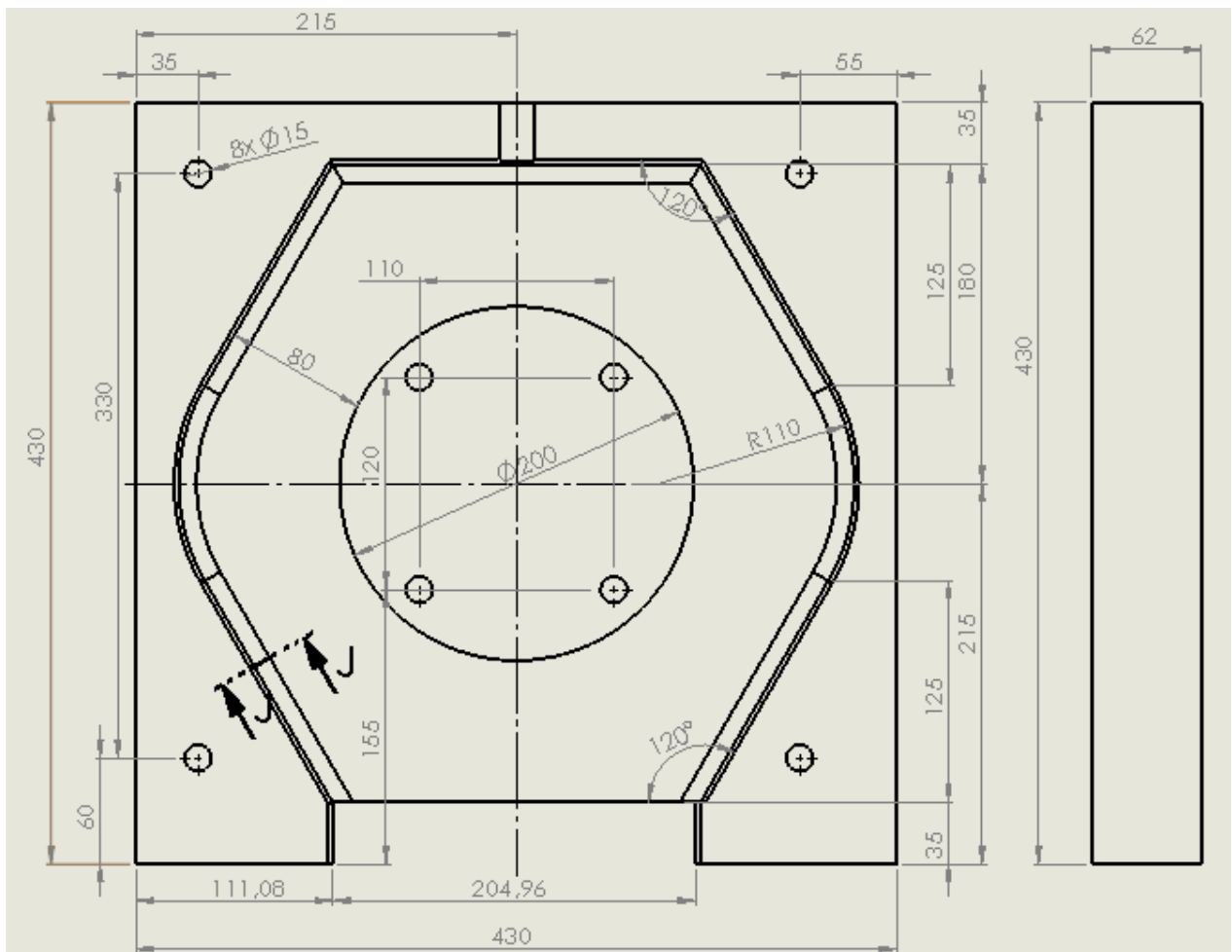
Jelikož má epoxidová pryskyřice maximální teplotu, do které může bez případných problémů pracovat, je nutné tuto teplotu nějakým vhodným způsobem hlídat. Proto bylo navrženo měření teploty uvnitř epoxidové vrstvy pomocí termistoru. Termistor byl vybrán PTC KTY81-110, který má při teplotě 25 °C hodnotu odporu 1 k $\Omega$  a měřicí rozsah -55 až 150 °C, což je v mezích pracovní oblasti epoxidové vrstvy. Termistor bude vložen do epoxidové vrstvy během zalévání transformátoru. Umístění bylo vybráno v blízkosti vývodů vinutí, tedy co nejbližše případně namontované svorkovnice. Pro rychlé změření teploty lze na vývody termistoru připojit ohmmetr.

Během návrhu se uvažovalo i o teplotní pojistce, která by při překročení maximální dovolené teploty (100 °C) vybavila a přerušila tak napájení transformátoru, než by došlo k jeho poškození. Bohužel se nepodařilo najít tepelnou pojistku s takovými parametry, které jsou potřeba pro navrhovaný transformátor. Hlavním problémem je napětí, kde v případě této práce je vstupní napětí 400 V, zatímco ve většině prodejnách jsou tepelné pojistky maximálně do 250 V. Tepelná pojistka byla tedy zvolena pro 230 V s maximální teplotou 100 °C. Tato pojistka může tedy pracovat pouze do 230 V. Pojistka je vyvedena pomocí dvou šedých vodičů, které jdou vidět na Obr. 3.1. Ty budou připojeny na svorkovnici transformátoru a dále na stykač. Transformátory budou většinou pracovat o třech modulech v sérii. Tepelná pojistka zde nebude transformátory vypínat, ale bude pouze signalizovat vypnutí. Při přehřátí jednoho transformátoru se poté vypnou všechny tři moduly.

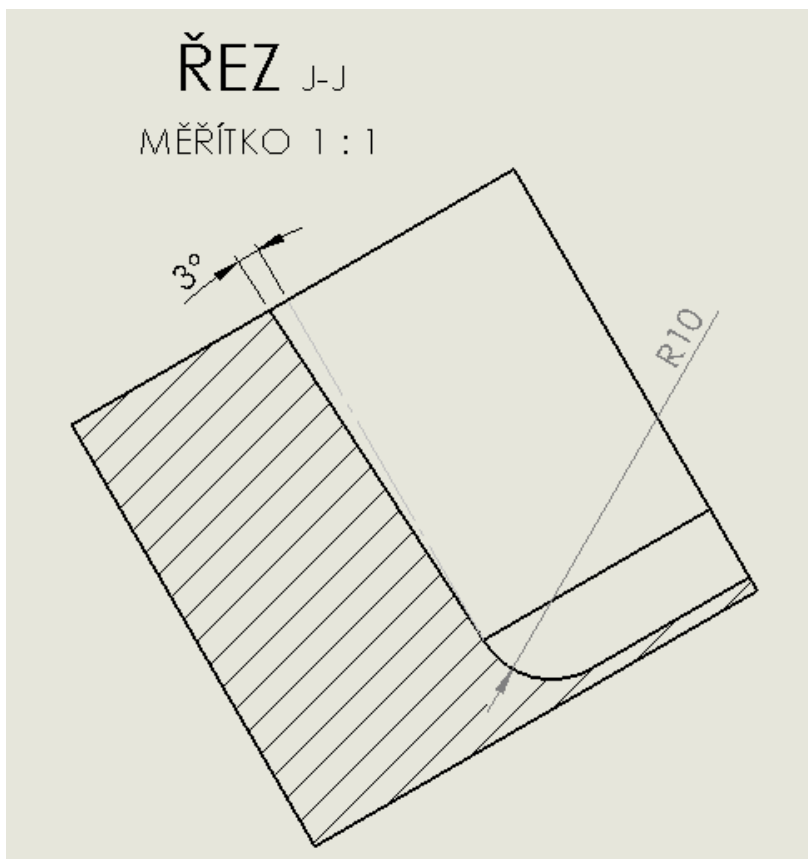
Nyní zbývá vymyslet formu pro zalévání. S návrhem formy souvisí pak finální design transformátoru. Je tedy potřeba, aby forma byla navržena s ohledem na pozdější vzhled transformátoru. Navržená forma je vidět na Obr. 3.6. Jako materiál je použito dřevo. Jedná se o jednu polovinu celkové formy. Způsob zalévání je totiž takový, že forma je rozdělena na dvě poloviny, aby se do ní mohl transformátor vložit a pak následně mohla forma odebrat. Spodním otvorem se bude nalévat epoxid. Vrchní díra o poloměru 10 mm slouží pro vodiče. Osm děr o průměru 15 mm slouží pro šrouby. Šrouby slouží ke snadnému oddělení forem po ztvrdnutí epoxidové pryskyřice. Tvar není čistě toroidní z toho důvodu, aby bylo transformátor možno lehce uchopit na stranách. Vzdálenost od vnitřního průměru ke stěně formy je 80 mm. To lze vidět na Obr. 3.7. Rozdíl mezi vnějším a vnitřním poloměrem transformátoru je 45 mm. K tomu je ale zapotřebí přičíst velikost vinutí, izolace a neoprenové vrstvy. Vinutí s izolací má velikost přibližně 4 mm, neoprenová vrstva 3 mm. Pro jistotu se velikost vinutí, izolace a neoprenu zaokrouhlila na 10 mm. Jádro s vinutím, izolací a neoprenem bude mít tedy vnější průměr 350 mm a vnitřní 220 mm. Hodnota 80 mm je tedy volena proto, aby na vnější straně transformátoru byla velikost epoxidové vrstvy alespoň 5 mm a na vnitřní straně alespoň 10 mm.



Obr. 3.6 Forma pro zalévání do epoxidu.

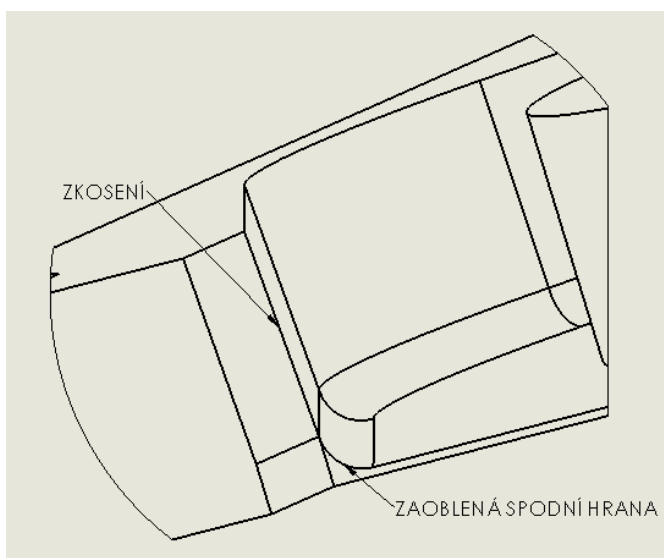


Obr. 3.7 Rozměry formy.



Obr. 3.8 Řez J-J z Obr. 3.7

Na Obr. 3.8 lze vidět detail zkosení postranních stěn formy a zaoblení spodní hrany. Zkosení je po celé délce postranní stěny formy. Stejně tak i zaoblení je po celé délce spodní hrany. Je to z toho důvodu, aby se transformátor dal lehce vyndat z formy po zalévání. Tímto způsobem transformátor „nepřilne“ ke stěnám formy.



Obr. 3.9 Detail zkosení a zaoblení.



Tato forma měla být poslána na výrobu, jenže se poté zjistilo, že výroba takto navržené formy by dosáhla hodně vysoké ceny, skoro stejné jako za navržený transformátor. Proto se přistoupilo k náhradnímu a o hodně finančně přijatelnějšímu řešení. Forma bude z PVC trubek typu KG, které se používají pro podzemní kanalizaci. Tím se sice omezí možnosti finálního tvaru transformátoru, ale při porovnání cen předchází formy a formy pomocí rour KG, tak je to zanedbatelný problém.

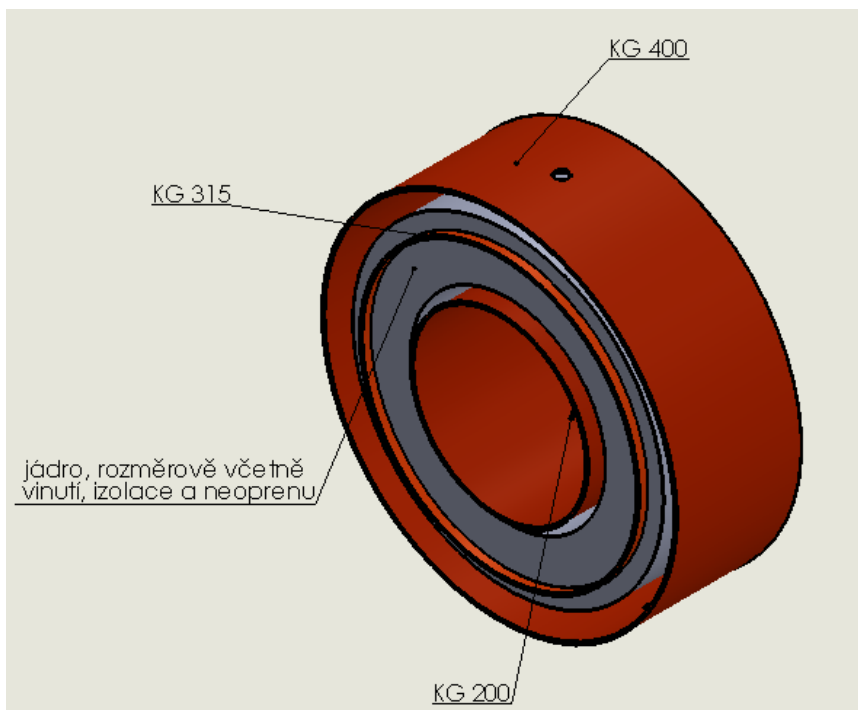
Forma se skládá celkem ze tří rour. Jako vnější strana slouží roura o průměru 400 mm. Tím se oproti minulé formy zvedne spotřeba epoxidové pryskyřice, ale ne o tolik, aby to byl problém, co se týče nákladů. Vnitřní strana je roura o průměru 200 mm. Třetí roura má průměr 315 mm a slouží jako výztuha, aby transformátor byl symetricky uložen ve formě.



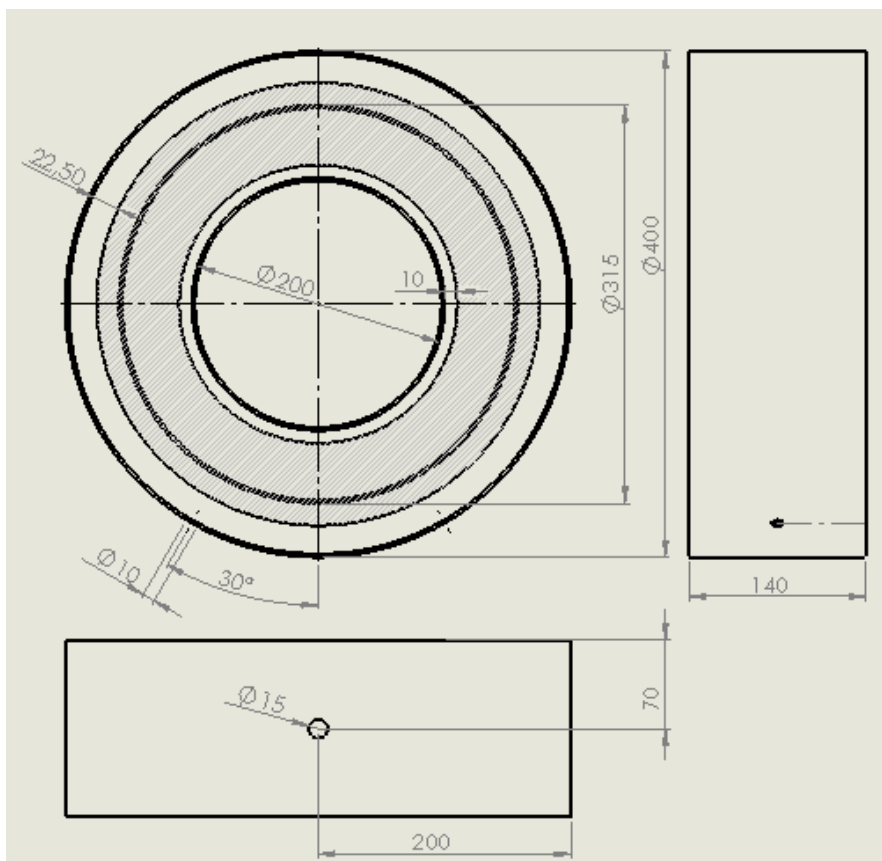
Obr.3.10 Roura KG 400. (<http://www.pcvalfa.cz/pr-img/66/1/max/20535c53-fa48-4b3d-ba53-070b56b156d5.jpg>)

Roury KG400 a KG200 byly nařezány na délku 140 mm, roura KG315 na 10 mm. Z toho vyplývá, že tedy po zalití bude mít transformátor celkovou výšku 140 mm. Jestliže se uvažuje, že velikost vinutí s izolací a neoprenem bude mít velikost 10 mm, bude na vnější straně vrstva neoprenu o velikosti 22,50 mm, na vnitřní straně 10 mm a na přední a zadní straně taktéž 10 mm. Princip formy lze vidět na Obr. 3.11, rozměry na Obr. 3.12. Na obrázcích si lze všimnout celkem tří děr v rouře KG 400. Vrchní díra o průměru 15 mm slouží pro kabely transformátoru. Do spodních dvou děr o průměru 10 mm se vloží před zalitím šrouby, které pak dále slouží pro namontování podstavy transformátoru. Jak transformátor po zalití vypadá, je vidět na Obr. 3.13. Na obrázku jde taky vidět termistor, který byl řešený dříve v této kapitole. Jak lze vidět, byl zalit v blízkosti vývodů transformátoru. Detail jeho umístění je na Obr. 3.14. Pro větší přehlednost byla epoxidová pryskyřice v modelu zprůhledněna. Detail zalití šroubů pro podstavu je na Obr. 3.15. Šrouby byly použity DIN 603 o velikosti M10x45. Trubka KG315 je taktéž zalita do epoxidové pryskyřice, což ničemu nevádí, jelikož případným teplotám PVC trubka odolá.

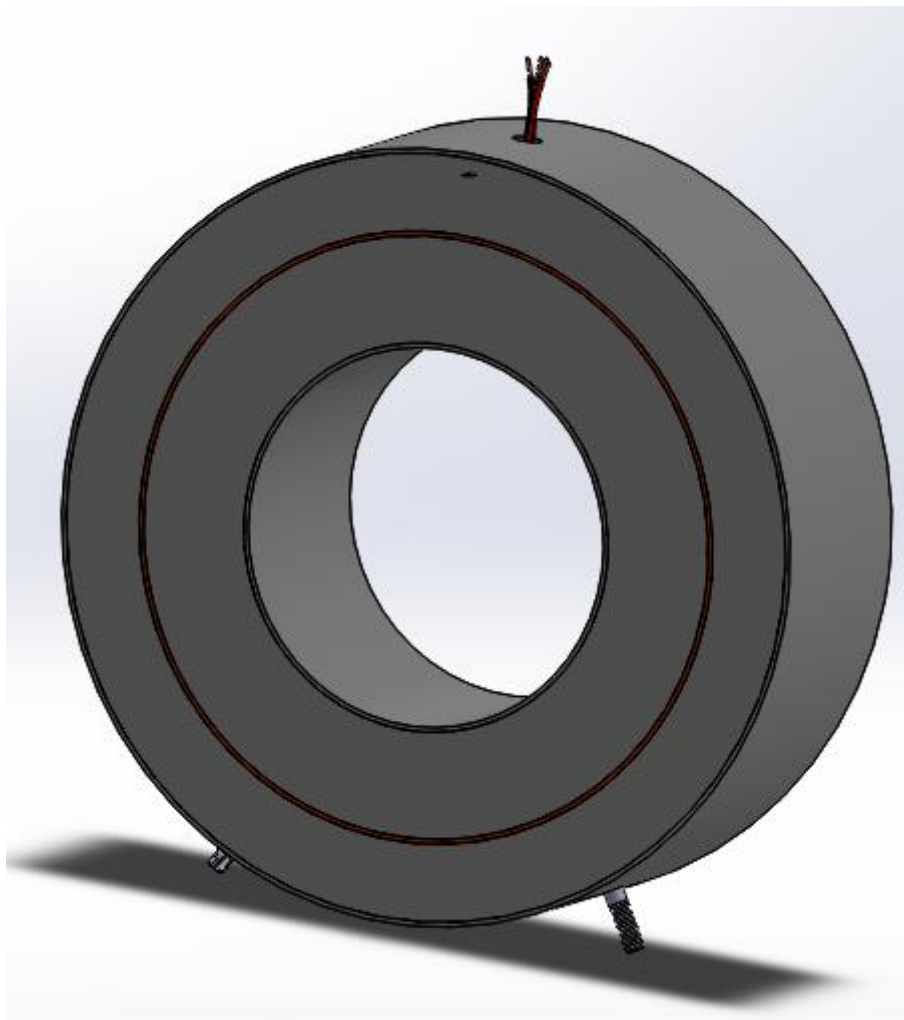
Je potřeba také navrhnout podstavu, na které bude transformátor uložen. Podstava by měla být dostatečně pevná, aby unesla celou váhu transformátoru, a také musí mít vhodný tvar, aby se transformátor nepřevrátil a tím se poškodil nebo způsobil újmu na zdraví člověka. Podstava byla vymyšlena jako ocelový plech o tloušťce 2 mm. Plech je k transformátoru přimontovaný pomocí matic a zalitých šroubů. Je tedy možné ho podle potřeby kdykoliv odmontovat. Matice byly zvoleny DIN 934 M10. K matici je taky potřeba podložka, byla zvolena DIN 125A M10.



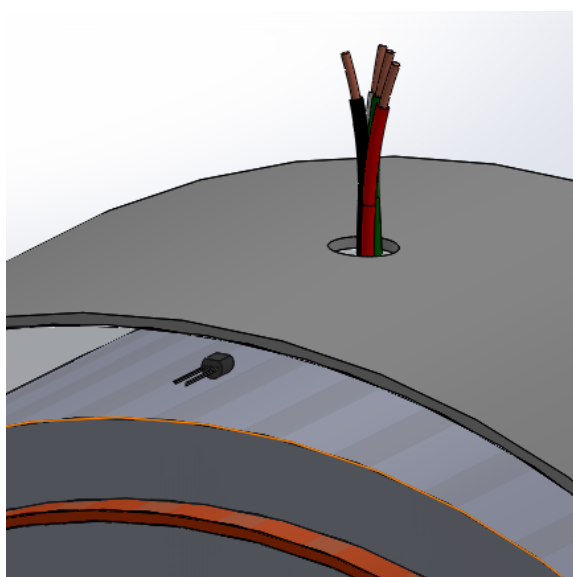
Obr. 3.11 Forma z trubek KG.



Obr. 3.12 Rozměry nové formy.

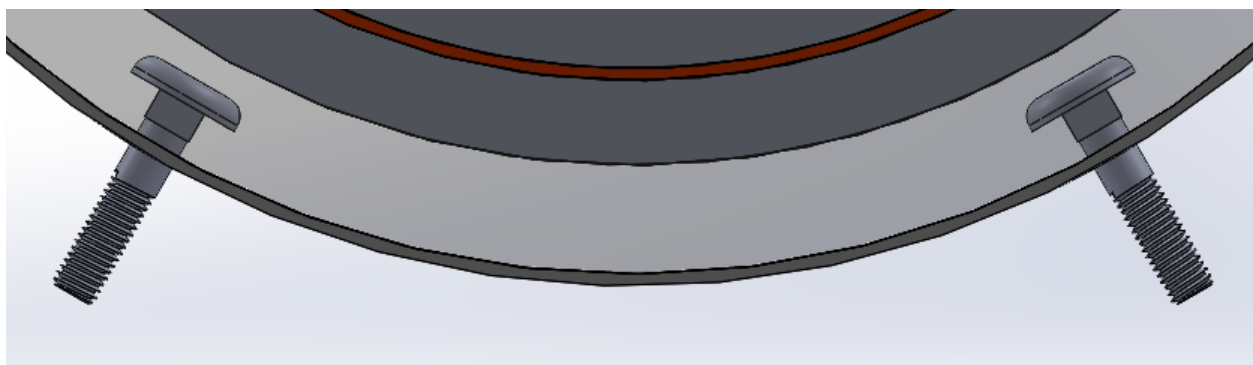


*Obr. 3.13 Transformátor po zalití.*

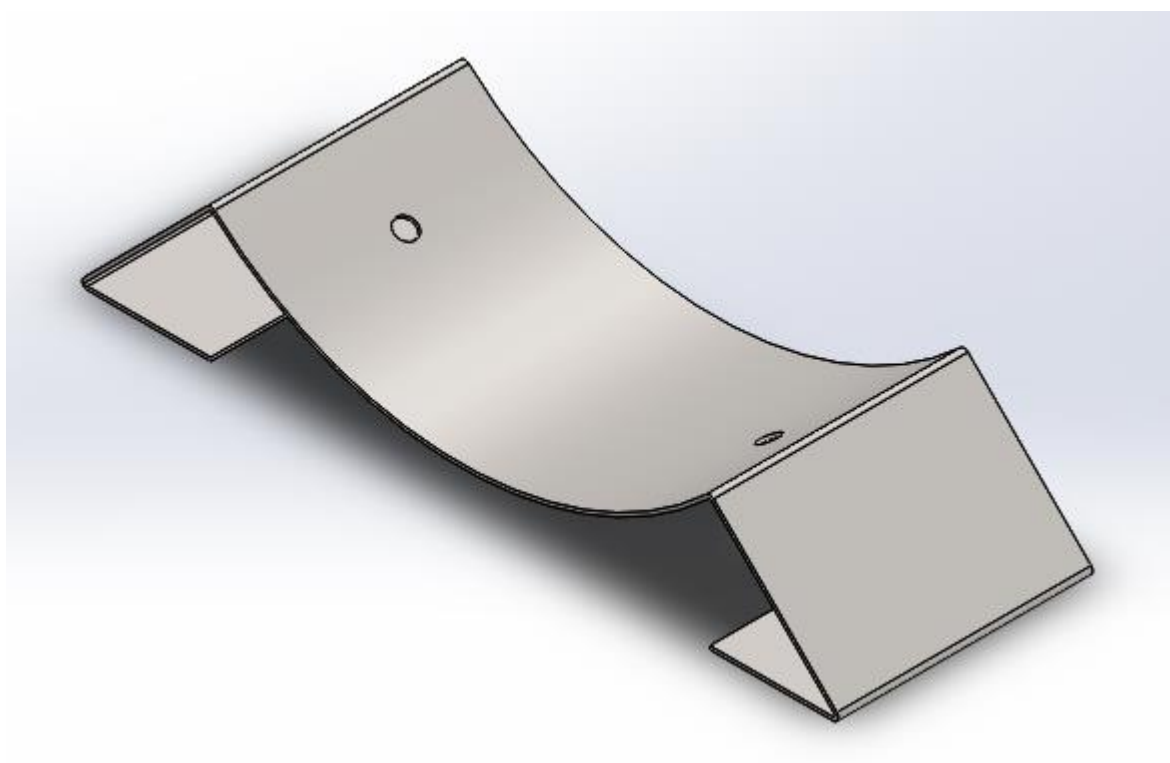


*Obr. 3.14 Detail zalití termistoru.*

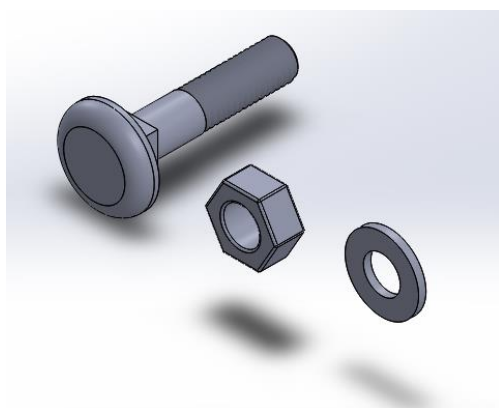




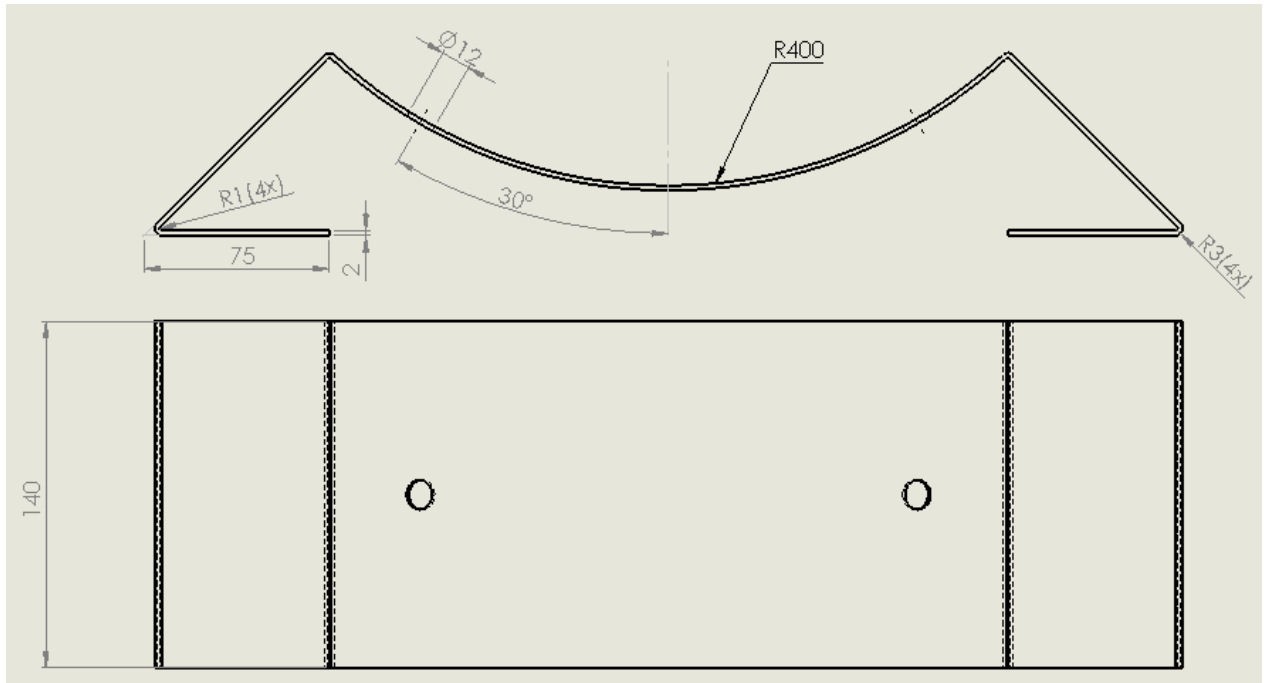
*Obr. 3.15 Detail zalití šroubů.*



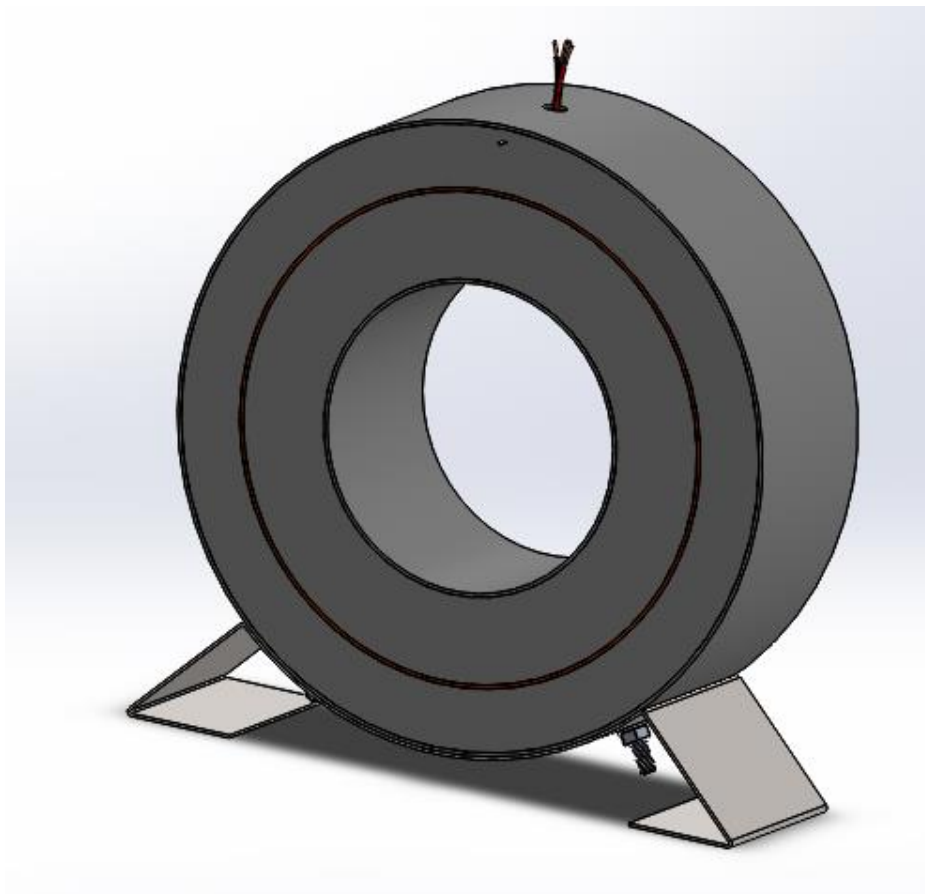
*Obr. 3.16 Navržená podstava.*



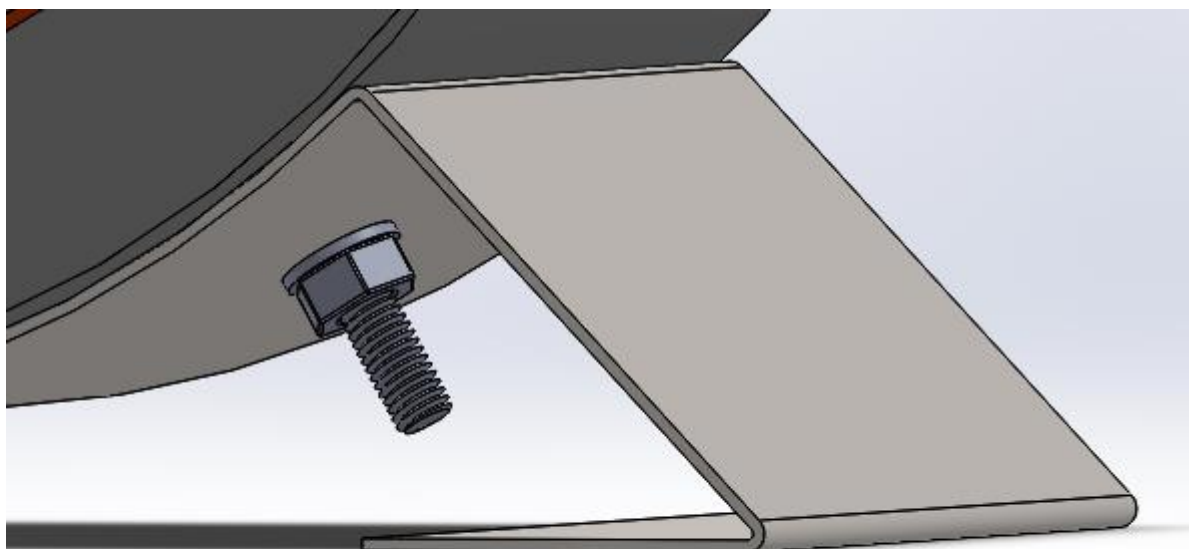
*Obr. 3.17 Šroub DIN603 M10, matice DIN934 M10, podložka DIN125 M10*



Obr. 3.18 Rozměry podstavy.



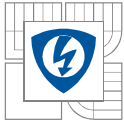
Obr. 3.19 Zalitý transformátor s podstavou.



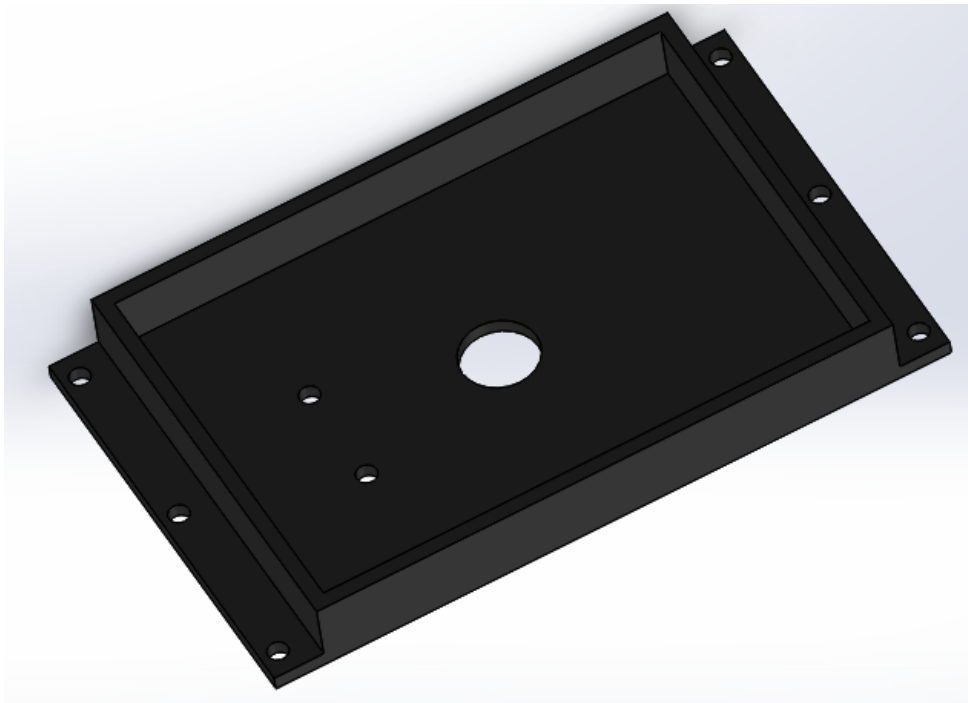
*Obr. 3.20 Detail podstavy.*

Na Obr. 3.20 jde vidět detail montáže podstavy. Jestli podstava není zrovna potřeba, stačí odšroubovat matici a podstavu sundat.

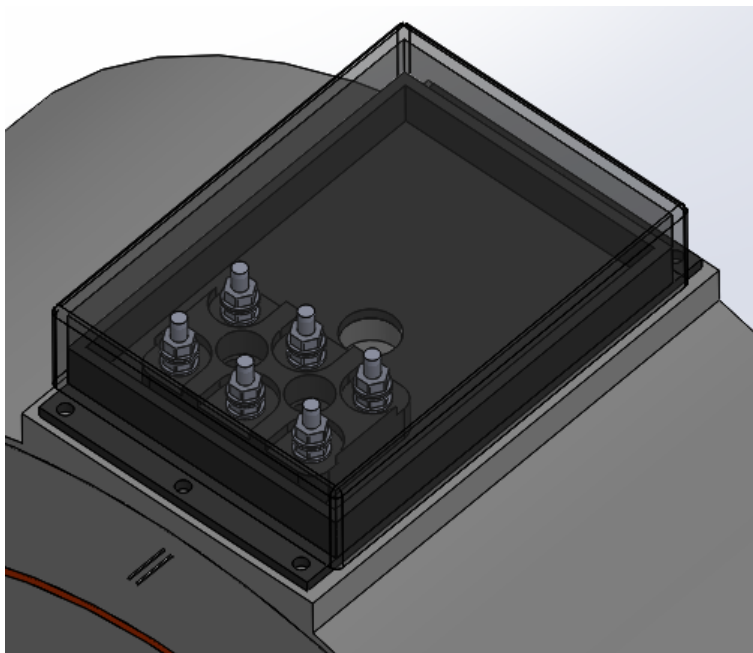
Dále je nutné navrhnout přimontování svorkovnice a případné krabičky pro svorkovnici. Svorkovnice je použita z Obr. 3.5. Na obrázku si lze všimnout dvou prostředních děr, které slouží pro šrouby k přimontování svorkovnice. Pro přimontování je potřeba podstava, aby svorkovnice byla na rovném povrchu a šrouby měly dostatečnou hloubku pro zavrtání. Podstavu je tedy potřeba dolít. Byly zvoleny rozměry 90x140x10 mm. Jsou tedy dostatečné rezervy pro svorkovnici a případnou krabičku. Šrouby se nebudou přímo vrtat do epoxidové vrstvy, ale použijí se zálisky do plastu. Zálisky jsou voleny z firmy SIMAF velikosti M4 a výšce 8 mm. Tyto zálisky se zalijí při dolévání podstavy. Stejně zálisky také platí pro plastovou krabičku. Při návrhu bohužel nebylo schopné najít vyhovující plastovou krabičku s otvory pro přívodní vodiče či otvorem na spodním díle krabičky pro vodiče transformátoru. Krabičku bude nutné tedy upravit. Byla vybrána dvoudílná plastová krabička o rozměrech 136x83x41 mm, která je vidět na Obr. 3.21. Do spodního dílu krabičky se vyvrtají dvě díry pro svorkovnici o průměru 4 mm. Další otvor je potřeba pro vodiče transformátoru, ten je vyvrtán přesně uprostřed o průměru 15 mm. Jak vyvrtané otvory vypadají lze vidět na Obr. 3.22. Svorkovnice a krabička na dolité podstavě jde vidět na Obr. 3.23. Pro připojení kabelů stačí jen vrchní díl krabičky odebrat. Pro přimontování jsou použity šrouby velikost M4.



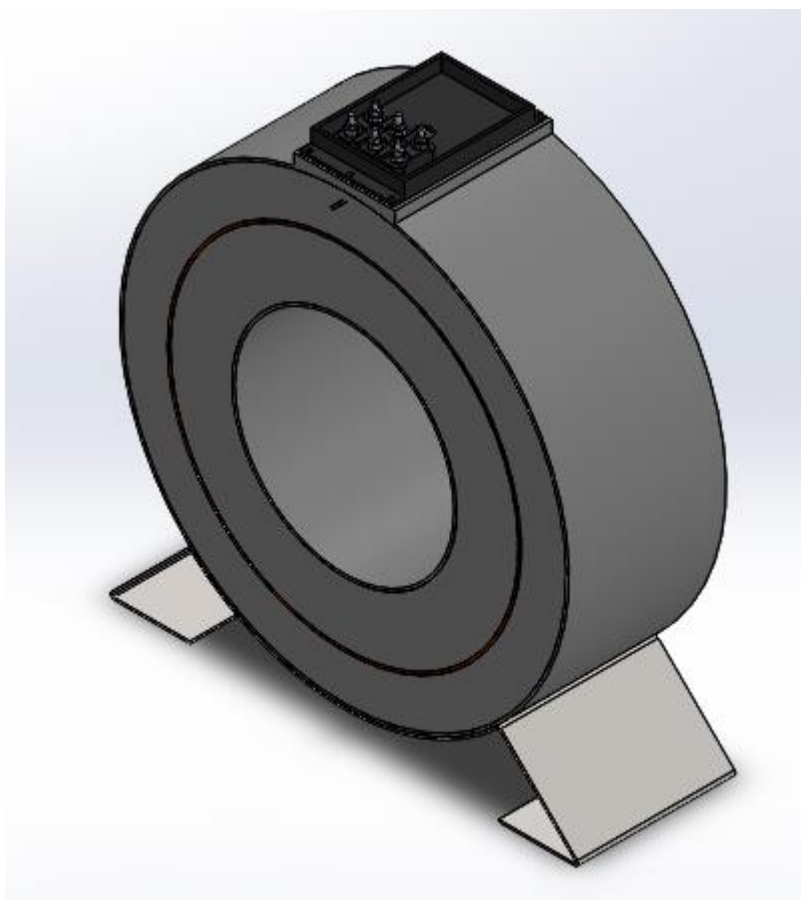
Obr. 3.21 Plastová krabička. (<http://www.gme.cz/img/cache/800x600/627/058/krabicka-plastova-wm032-i-abs-obrazek-1.jpg>)



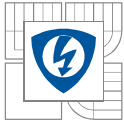
Obr. 3.22 Spodní díl krabičky s dírami.



*Obr. 3.23 Svorkovnice a krabička na dolité podstavě. Vrchní díl krabičky je v modelu zprůhledněn.*



*Obr. 3.24 Finální vzhled transformátoru. Krabička je zde bez vrchního dílu.*

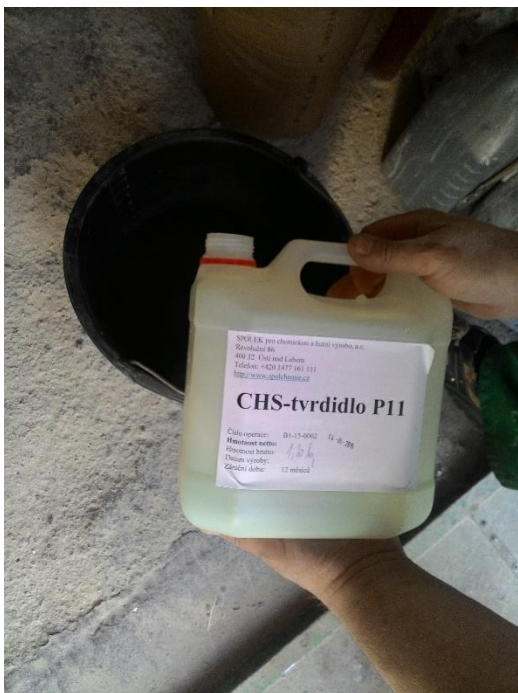


### 3.6 Zalévání do epoxidu

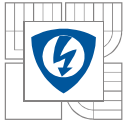
Podle předchozí kapitoly je tedy použita epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 531 a tvrdidlo CHS-P11. Tyto dvě hmoty byly spolu smíchány v poměru daném v předchozí kapitole. Mísení těchto dvou složek trvá asi 2-3 minuty [10]. Tím se vytvoří základní kompozice (Obr. 3.25 a Obr. 3.26). Dále bylo do této kompozice zamícháno plnidlo Füller také v daném poměru (Obr. 3.27). Takto hotová směs je tedy připravena k zalévání do předem nachystané formy (Obr. 3.28). Musí se nalévat opatrně, aby byl transformátor rovnoměrně zalit (Obr. 3.29). Při teplotě 20 °C směs tvrdne přibližně 7 dní. Transformátor po zalití a zbrúšení je vidět na Obr. 3.31.



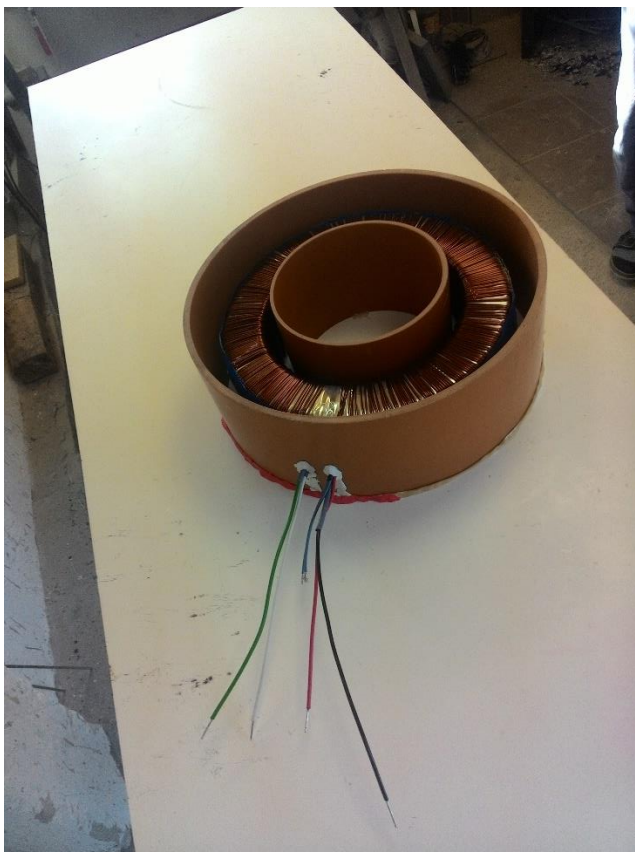
Obr. 3.25 Epoxidová pryskyřice.



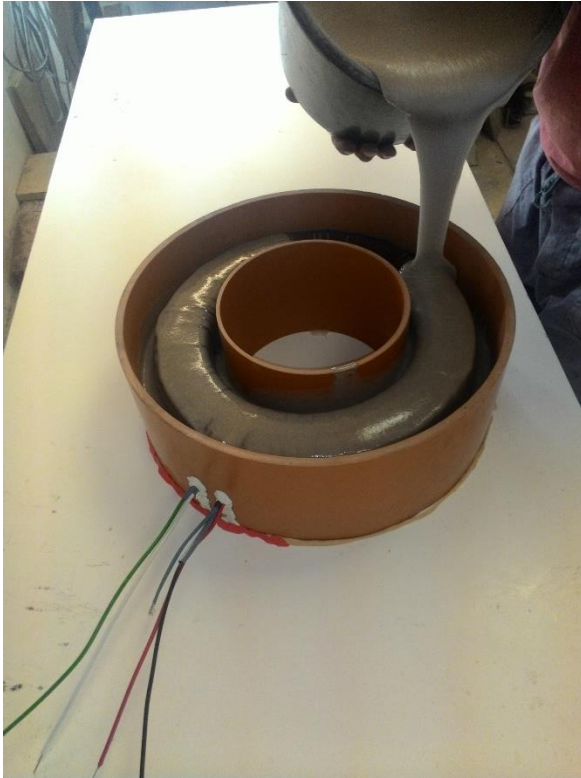
Obr. 3.26 Tvrdidlo.



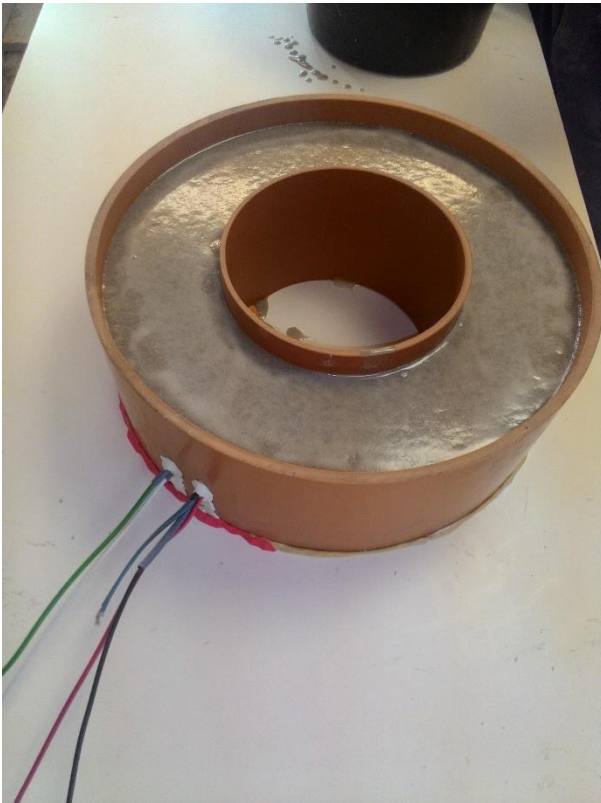
*Obr. 3.27 Smíchání kompozice s plnidlem.*



*Obr. 3.28 Nachystaná forma pro zalévání.*

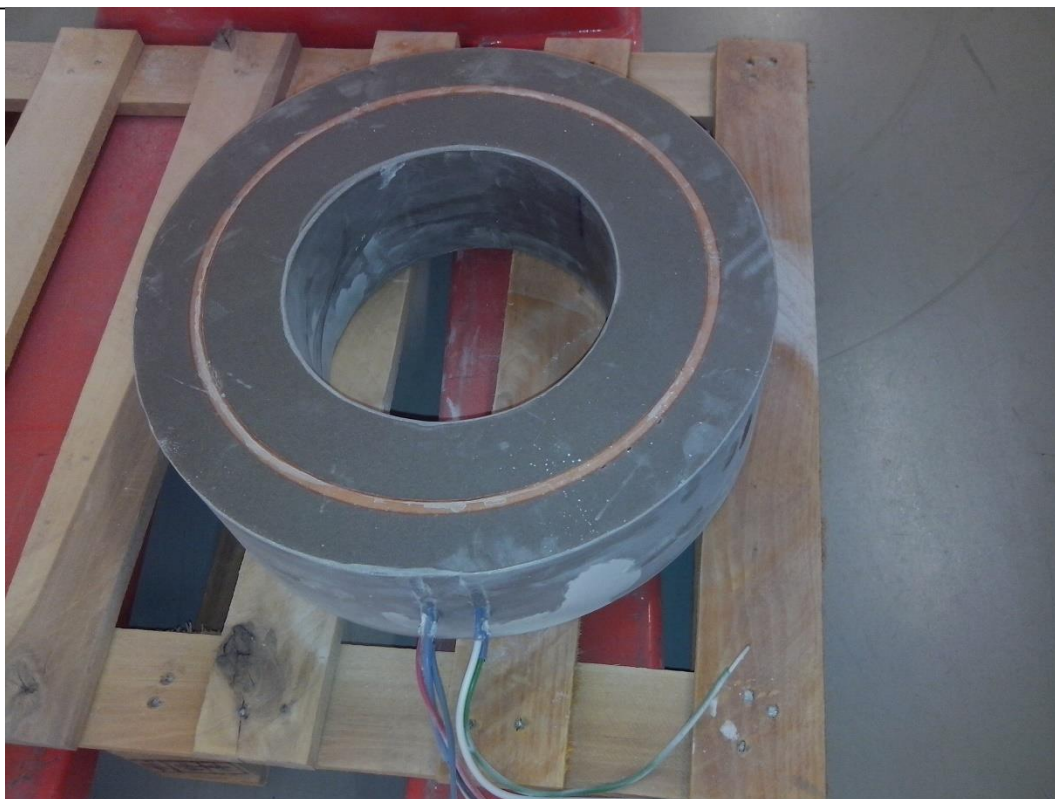


*Obr. 3.29 Zalévání.*



*Obr. 3.30 Zalitý transformátor.*





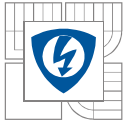
*Obr. 3.31 Transformátor po zalití a zbroušení.*

## 4 NAPÁJENÍ

Transformátor může být napájen mnoha způsoby. Jelikož transformátor bude sloužit pro oteplovací zkoušky a testy jističů, je potřeba plynulá regulace primárního napětí. K tomu může sloužit autotransformátor, díky kterému je možno plynule regulovat napětí. Oteplovací testy a zkoušky budou prováděny ve zkratovně, kde je k dispozici frekvenční měnič. Měnič má oproti autotransformátoru více výhod, jako je plynulejší regulace, větší výkon či menší ztráty. Pro napájení transformátoru bude tedy použit frekvenční měnič.

## 5 MĚŘENÍ

Měření bylo provedeno na nezalitém transformátoru. Transformátor byl napájen pomocí autotransformátoru. Sekundární vinutí bylo formou jedné přípojnice o rozměrech 100x10 mm vedené oknem transformátoru. Zapojené pracoviště je na Obr. 5.1. První bylo provedeno měření naprázdno s jedním vinutím, kde napětí bylo přiváděno na černý a zelený vodič. Zde se nastavovalo primární napětí po 20 V a měřil se primární proud naprázdno. Dále bylo provedeno měření už při zatížení transformátoru přípojnicí. Toto měření bylo provedeno pro jedno vinutí. Třetí a poslední měření bylo při zatížení pro primární vinutí zapojené do série, tedy 720 závitů. Vlevo na obrázku níže je vidět paralelně zapojený digitální multimetr, který sloužil jako voltmetr. Vpravo další multimetr jako ampérmetr.



Obr. 5.1 Měření.

Tabulka 2 Měření naprázdno.  $U_{01}$ = primární napětí naprázdno [V],  $I_{01}$ =primární proud naprázdno [mA].

$U_{01}$ [V]	$I_{01}$ [mA]
0	1,54
20,96	5,65
40,16	9,43
59,1	12,78
82,2	16,47
102	19,31
121,7	21,98
140,7	24,45
161,7	27,98
181,3	29,4
200	31,65
223,5	34,24
241,8	36,15
261,4	38,41
300	42,84
322,4	45,44
351,4	49,08
380,6	53,53
388,7	54,92



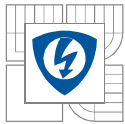
Tabulka 3 Měření při zatížení (pouze jedno vinutí, tj. 360 závitů).  $U_1$ =primární napětí [V],  $I_1$ =primární proud [A],  $I_2$ =sekundární proud [A].

$U_1$ [V]	$I_1$ [A]	$I_2$ [A]
2,6	0,176	63
11	0,715	260
22,8	1,469	532
31,8	2,041	737
41,61	2,678	966
57	3,65	1317
71,7	4,592	1657
81,6	5,215	1885
94,2	6,041	2178
107,6	6,894	2486
119,4	7,646	2759
128,4	8,21	2961
134,4	8,58	3097
141	9,005	3252

Tabulka 4 Měření při zatížení (obě vinutí spojená do série, tj. 720 závitů).  $U_1$ =primární napětí [V],  $I_1$ =primární proud [A],  $I_2$ =sekundární proud [A].

$U_1$ (V)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)
18,95	0,3	216
40,09	0,64	463
65	1,03	745
82,9	1,3119	948
100,3	1,591	1147
120,8	1,915	1384
141,9	2,24	1617
181,3	2,87	2073
201	3,19	2304
231,4	3,65	2639
262,7	4,15	2998
299,1	4,72	3419
321,4	5,06	3654
351,1	5,51	3890
382,5	6,052	4035

V Tabulka 1 lze vidět, že při 388,7 V dosahuje hodnota proudu naprázdno velikost 54,92 mA. Podle rovnice (2.5-8) je vypočtená hodnota proudu naprázdno 0,300 A. Tento rozdíl je způsoben volbou materiálu jádra. Při návrhu byla zvolena křemíková ocel z literatury [5], v níž

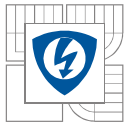


---

jsou uvedeny parametry pro magnetickou indukci 2,0 T. Transformátor byl ale vyroben z jiného materiálu s parametry pro menší magnetickou indukci, v našem případě 0,585 T.

Z Tabulka 3 a Tabulka 4 lze vidět rozdíl mezi použitým vinutím. V případě zapojení pouze jednoho vinutí, tedy 360 závitů, dosahovala hodnota proudu 3252 A při 141 V, zatímco při spojeném vinutí do série, tedy 720 závitů, byla hodnota 3252 A dosažena v rozmezí 262,7 až 299,1 V. Plyne to jak z převodu, tak i z magnetického sycení.

V průběhu měření byla také změřena teplota transformátoru a přípojníc. Transformátor byl měřen celkem jednu hodinu a během této hodiny se zahřál pouze na 30 °C. Přípojnice měly na konci cca 80 °C.



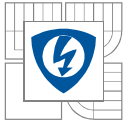
## 6 ZÁVĚR

Závěrem práce je zhotovený modulární zdroj o zadaných parametrech. Zdroj je tedy formou toroidního transformátoru celkem o devíti modulech. Materiál jádra byl volen z normy EN 10107. Velikost jádra byla navrhována za pomoci vedoucího a firmy Therma FM, která jádro vyrábí. Nemohla se volit ledajaká velikost, jelikož každá firma má své dané velikosti, které může vyrobit. Vnější průměr jádra je tedy 330 mm a vnitřní průměr 240 mm. Na základě této velikosti pak byla vypočítána magnetická indukce. Uvažovalo se o velikosti přibližně 1,5 T, ale indukčnost vyšla v podstatě menší, a to 0,585 T. Proto se navrhlo řešení v kapitole 2.4 ve formě rozdělení vinutí na polovinu. Maximální magnetická indukce je závislá na amplitudě napětí, počtu závitů, velikosti jádra a frekvence. Frekvence a amplituda napětí zůstávají stejné a velikost jádra taktéž, jelikož jádro už bylo vyrobeno. Proto se může měnit pouze počet závitů. Toto řešení proběhlo po dohodě s vedoucím práce. Tím se magnetická indukce dvakrát zvětšila a dosáhla tak skoro uvažované hodnoty 1,5 T.

Hmotnost jádra vyšla 29,32 kg podle rovnice (2.5-2). Váha mědi podle rovnice (2.6-9) 4,66 kg. Celková váha jednoho modulu bez epoxidové vrstvy je tedy 34 kg. Ztráty v železe transformátoru vyšly podle rovnice (2.5-3) 43,98 W a ztráty ve vinutí pro 720 závitů z rovnice (2.6-4) 115,15 W. Celkové ztráty, které se v transformátoru vyskytnou při normální teplotě, jsou tedy podle rovnice (2.7-2) 159,13 W, což se dá označit za poměrně malé ztráty vzhledem k požadovanému výstupnímu výkonu. Celková účinnost transformátoru dosahuje hodnoty 95,68 %. Účinnost je spočítána pro oba vinutí spojená do série, tedy 720 závitů, jelikož v takovém případě jsou největší ztráty ve vinutí.

Jak již bylo řečeno v Úvodu, jádro transformátoru bylo vyrobeno firmou Therma FM. Navinutí a bandážování zhotovené firmou JK- Elektra. Vyrobený transformátor jde vidět na Obr. 3.1. Všech devět modulů poté na obrázku dál. Takto vyrobený transformátor byl změřen a otestován. Měření a testování je obsaženo v kapitole 5. Dále bylo potřeba navrhnout formu pro zalévání do epoxidu a různé mechanické dodatky, jako je svorkovnice, měření teploty, tepelná pojistka či podstava. Podle kapitoly 3.5 byly navrženy celkem dvě formy. Od řešení první formy se tedy upustilo z finančních důvodů. Po nacenění se totiž zjistilo, že jedna taková forma by stála skoro stejně, jako všech 9 modulů dohromady. Proto se přistoupilo k formě druhé, která je zhotovena z odpadních trubek KG. Roury byly nakoupeny a poté nařezány na určité rozměry. Výroba formy probíhala na dílně VUT FEKT na T12. Po zhotovení formy mohlo proběhnout zalévání. Typ epoxidové pryskyřice, tvrdidla a plniva je zmíněn v kapitole 3.5. Následný postup zalití a dokumentace je v kapitole 3.6. Po zalití byl transformátor zbroušen a upraven. V jakém stavu je transformátor po dokončení této bakalářské práce je vidět na Obr. 3.31.

Bohužel se nestihlo dodělat několik návrhů, mezi něž patří měření teploty, svorkovnice a podstava. Všechny tyto věci se budou řešit i po dokončení této práce, jenže nebudou zde již obsaženy. Pro svorkovnici bude ještě dolita podstava podle kapitoly 3.5, která bude obsahovat zálsky pro krabičku i svorkovnici. Měření teploty není zase tak důležité, jelikož už transformátor obsahuje tepelnou pojistku. Pro podstavu se bude muset sehnat plech o tloušťce 2 mm a v dílně ho nařezat a dále ohnout do tvaru podle kapitoly 3.5.



---

Podle zadání se také musí vyřešit zapínací obvod, aby nedošlo k překmitu první periody proudu. To je řešeno boostrem, díky kterému se bude pomalu zvyšovat napětí na hodnotu 400 V, aby nedošlo k proudovým nárazům.



---

## LITERATURA

- [1] *Vysoké napětí a elektrické přístroje: Laboratorní a numerická cvičení část II.: Měření oteplení elektrického přístroje.*
- [2] VALENTA, Jiří *Elektrické přístroje (BEPR): Zkoušky jistících a spínacích přístrojů.*
- [3] *Skripta BESB: Úvod a transformátory.*
- [4] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje.* Vydavatelství ČVUT, 2000.
- [5] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice.* Vysoké učení technické v Brně: VUTIUM, 2011.
- [6] [online]. [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-pevne.htm>
- [7] Tabulky předmětu Rozvodná zařízení, VUT FEKT.
- [8] MUCHA, J. *Diagnostika vlastností elektroizolačních zalévacích hmot.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2014. 70 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [9] BENEŠ, Miroslav. *Kinetika vytvrzování epoxidových pryskyřic: Bakalářská práce.* Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická, 2005.
- [10] SPOLCHEMIE, Aplikační list pro CHS-EPOXY 531, 2011