

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh průmyslového transformátoru malého výkonu

Vedoucí práce: Ing. Karel Hruška, PhD.

Autor: Bc. Petr Doležal

2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr DOLEŽAL**

Osobní číslo: **E15N0050P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**

Název tématu: **Návrh průmyslového transformátoru malého výkonu**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

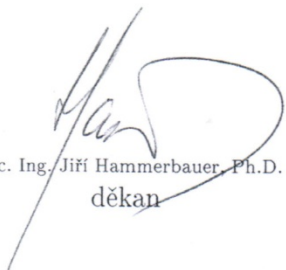
1. Navrhněte průmyslový transformátor malého výkonu dle zadání konzultanta práce.
2. Proveďte typovou zkoušku transformátoru dle EN 61558.
3. Proveďte porovnání naměřených a vypočtených parametrů transformátoru.
4. Diskutujte vliv rozměrů magnetického obvodu na účinnost transformátoru a jeho celkové dovolené oteplení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

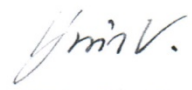
1. Petrov, G. N.: Elektrické stroje: 1. Transformátory. Academia, Praha, 1980.
2. ÚNMZ: ČSN EN 61558 - Bezpečnost výkonových transformátorů, napájecích zdrojů, tlumivek a podobných výrobků.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016
Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na celkový návrh průmyslového transformátoru malého výkonu. Je zde proveden kompletní elektromagnetický výpočet, podle kterého je poté transformátor vyroben a je na něm provedena typová zkouška dle ČSN EN 68551-1 ed. 2. Dále jsou hodnoty získané touto zkouškou porovnány s hodnotami vypočtenými, je provedeno zhodnocení a v závěru práce je diskutována možná změna rozměrů magnetického obvodu a následný dopad na účinnost a oteplení magnetického obvodu transformátoru.

Klíčová slova

Transformátor, magnetický obvod, náhradní schéma, typová zkouška transformátoru, vinutí, EI plechy, návrh transformátoru.

Abstract

This diploma thesis is focused on design of a low power industrial transformer. There is a complete electromagnetic calculation, according to which the transformer is then manufactured and then a type test is carried out according to the standard ČSN EN 68551-1. Further, the values obtained by this test are compared with the calculated values, an evaluation is performed and at the end of the thesis a possible change in the dimensions of the magnetic circuit and the subsequent impact on the efficiency and warming of the magnetic circuit are discussed.

Keywords

Transformer, magnetic circuit, equivalent circuit diagram of the transformer, type test of transformer, winding, EI sheets, design of transformer.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 17.5.2017

Bc. Petr Doležal

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Karlu Hruškovi, PhD. za odborné vedení práce a za poskytování cenných rad a připomínek v průběhu vypracovávání této práce, které mi velmi pomohly. Dále bych rád poděkoval pánům Ing. Kamilu Simetovi, Michalu Kocourovi a Ing. Rostislavu Vlkovi, PhD. za cenné rady z praxe, bez kterých by tato práce jen těžko vznikla a na závěr také své rodině a přítelkyni za podporu v průběhu celého mého studia.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
1 NÁVRH TRANSFORMÁTORU	14
1.1 ZADÁNÍ.....	14
1.2 VÝPOČET.....	14
1.2.1 Návrh magnetického obvodu.....	15
1.2.2 Návrh počtu závitů a použitých vodičů.....	16
1.2.3 Zaplnění kostry cívky.....	21
1.2.4 Výpočet hmotnosti.....	26
1.2.5 Výpočet parametrů náhradního schématu.....	34
1.2.6 Výpočet zapínacího proudu transformátoru.....	45
1.2.7 Výpočet oteplení transformátoru.....	47
2 MĚŘENÍ NA TRANSFORMÁTORU	50
2.1 POPIS JEDNOTLIVÝCH MĚŘENÍ PROVEDENÝCH NA TRANSFORMÁTORU.....	50
2.1.1 Měření výstupních veličin při jmenovitém zatížení.....	50
2.1.2 Otestování ochranného spojení se zemí.....	51
2.1.3 Měření naprázdno.....	51
2.1.4 Měření nakrátko.....	52
2.1.5 Oteplovací zkouška.....	52
2.1.6 Zkouška elektrické pevnosti.....	54
2.1.7 Ochrana před přetížením a zkratem.....	55
2.2 PROTOKOL O MĚŘENÍ NA TRANSFORMÁTORU.....	56
2.2.1 Použité měřicí přístroje.....	56
2.2.2 Měření výstupních veličin.....	57
2.2.3 Měření ochranného spojení se zemí.....	57
2.2.4 Měření naprázdno a nakrátko.....	58
2.2.5 Oteplovací zkouška.....	62
2.2.6 Zkouška elektrické pevnosti.....	66
2.2.7 Zkouška ochrany před přetížením a zkratem.....	67
2.2.8 Porovnání vypočtených a skutečných změřených parametrů transformátoru.....	69
3 ZÁVISLOST ZMĚNY ROZMĚRŮ MAGNETICKÉHO OBVODU NA ÚČINNOST TRANSFORMÁTORU A OTEPLENÍ MG. OBVODU	70
3.1 ZÁVISLOST VELIKOSTI MAGNETICKÉHO OBVODU NA MAXIMÁLNÍM VÝKONU TRANSFORMÁTORU ...	70
3.2 ZÁVISLOST VELIKOSTI MAGNETICKÉHO OBVODU NA ÚČINNOSTI TRANSFORMÁTORU.....	72
3.3 ZÁVISLOST VELIKOSTI MAGNETICKÉHO OBVODU NA JEHO OTEPLENÍ.....	73
ZÁVĚR	75
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	77
PŘÍLOHY	1

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na celkový elektromagnetický návrh průmyslového transformátoru malého výkonu, jeho následného sestavení a provedení typové zkoušky dle ČSN EN 68551-1. Celkový návrh je proveden na základě specifické poptávky zákazníka a celkové znění zadání je popsáno dále. Celá práce je rozdělena do tří základních částí.

V první části je proveden elektromagnetický návrh transformátoru dle zadání zákazníka. Kromě výpočtu velikosti magnetického obvodu a vinutí je zde vypočítána i hmotnost jednotlivých částí transformátoru. Dále jsou vypočteny hodnoty parametrů náhradního schématu transformátoru a z toho dále spočteny štítkové hodnoty transformátoru, přesněji napětí nakrátko a proud naprázdno. Konečná část návrhu je věnována výpočtu zapínacího proudu, podle kterého je navrženo jištění transformátoru a jako poslední je zde proveden tepelný výpočet, kterým je ověřeno maximální dovolené oteplení transformátoru kvůli použité izolaci.

Ve druhé části je na už postaveném transformátoru podle předešlého elektromagnetického návrhu provedena typová zkouška dle ČSN EN 61558-1. Na transformátoru byla provedena základní měření, jako je jmenovité zatížení, zkouška naprázdno a nakrátko. Dále je provedena oteplovací zkouška, jsou odměřeny izolační odpory, odolnost izolace vůči průrazu vysokým napětím a jako poslední jsou provedeny bezpečnostní zkoušky ochrany proti přetížení transformátoru a proti zkratu. Po odměření a dopočtení parametrů náhradního schématu a štítkových hodnot jsou hodnoty z teoretického elektromagnetického návrhu a hodnoty získané z hodnot z měření vepsány do tabulky a jsou mezi sebou porovnány a rozdíly prodiskutovány.

Poslední, třetí část, je zaměřena na to, jak velikost a kvalita použitých plechů ovlivňuje maximální možný výkon, který lze za daných kritérií na magnetický obvod určitých rozměrů nainstalovat, účinnost transformátoru a oteplení magnetického obvodu.

Seznam symbolů a zkratk

b_1	Tloušťka primární cívky [mm]
b_2	Tloušťka sekundární cívky [mm]
b_o	Šířka okna magnetického obvodu [mm]
b_j	Šířka magnetického obvodu [mm]
b_s	Šířka sloupku magnetického obvodu [mm]
B_m	Maximální magnetická indukce v jádře [T]
B_n	Jmenovitá magnetická indukce v jádře [T]
B_r	Remanentní (zbytková) magnetická indukce [T]
B_S	Saturační magnetická indukce jádra [T]
d_1	Jmenovitý průměr vodiče primární cívky [mm]
d_2	Jmenovitý průměr vodiče sekundární cívky [mm]
d_{1skut}	Skutečný průměr vodiče primární cívky včetně laku [mm]
d_{2skut}	Skutečný průměr vodiče sekundární cívky včetně laku [mm]
h_c	Výška cívek [mm]
f	Frekvence [Hz]
i_o	Poměrný proud naprázdno [%]
i_{peak}	Velikost první amplitudy zapínacího proudu [A]
I_1	Elektrický proud protékající primární cívkou [A]
I_2	Elektrický proud protékající sekundární cívkou [A]
I_μ	Magnetizační proud [A]
I_{Fe}	Proud respektující ztráty v železe [A]
I_o	Proud naprázdno [A]
J_1	Proudová hustota vodiče primární cívky [A/mm ²]
J_2	Proudová hustota vodiče sekundární cívky [A/mm ²]
k_T	Činitel zaplnění kostry cívky [%]
k_v	Činitel plnění železa [-]

k	Transformátorový převod [-]
l_p	Délka vodiče primární cívky [m]
l_s	Délka vodiče sekundární cívky [m]
l_{sp}	Výška spojky magnetického obvodu [mm]
l_{Fe}	Délka magnetického obvodu (paketu) [mm]
l_j	Výška magnetického obvodu [mm]
l	Výška okna magnetického obvodu pro výpočet rozptylu [mm]
l_{pri}	Skutečná délka vodiče primární cívky [m]
l_{sek}	Skutečná délka vodiče sekundární cívky [m]
$L_{1\sigma}$	Rozptylová indukčnost primární cívky [H]
$L_{2\sigma}$	Rozptylová indukčnost sekundární cívky [H]
m_{Cu}	Hmotnost mědi (vodičů) [kg]
m_{Fe}	Hmotnost magnetického obvodu (železa) [kg]
m_{celk}	Celková hmotnost transformátoru [kg]
N_1	Počet závitů primární cívky [závity]
N_2	Počet závitů sekundární cívky [závity]
PRI	Označení pro primární stranu transformátoru
P	Činný výkon [W]
Q_μ	Jalový výkon potřebný k magnetizaci jádra [VAr]
r	Procentní odpor transformátoru [%]
R_1	Odpor vodiče primární cívky [Ω]
R_2	Odpor vodiče sekundární cívky [Ω]
R_n	Ekvivalentní odpor transformátoru při jmenovitém zatížení [Ω]
R_{1n}	Odpor vodiče primární cívky při jmenovitém zatížení [Ω]
R_{2n}	Odpor vodiče sekundární cívky při jmenovitém zatížení [Ω]
R_{r1}	Odpor vodiče cívky na začátku oteplovací zkoušky [Ω]
R_{r2}	Odpor vodiče cívky na konci oteplovací zkoušky [Ω]
R_2'	Odpor vodiče sekundární cívky přepočítaný na primární stranu [Ω]

R_C	Tepelný odpor přestupu do chladiva cívek [W/K]
R_{iz}	Tepelný odpor kostry cívky [W/K]
R_{Fe}	Fiktivní odpor respektující ztráty v železe [Ω]
R_j	Tepelný odpor přestupu do chladiva magnetického obvodu [W/K]
$R_{stř}$	Střední poloměr vinutí transformátoru [mm]
S_1	Zdánlivý příkon transformátoru [VA]
S_2	Zdánlivý výkon transformátoru [VA]
S_{Fe}	Průřez jádra cívky (jednoho sloupku) [mm ²]
S_{skut}	Skutečný průřez jádra cívky (jednoho sloupku) po volbě plechů [mm ²]
S_C	Chladicí plocha cívky [mm ²]
S_j	Chladicí plocha magnetického obvodu [mm ²]
t_a	Teplota okolí, na kterou je transformátor navrhován [°C]
U_1	Napětí na primární straně transformátoru [V]
U_2	Napětí na sekundární straně transformátoru [V]
u_k	Poměrné napětí nakrátko [%]
U_k	Napětí nakrátko [V]
V_{Fe}	Celkový objem železa magnetického obvodu [mm ³]
V_{pri}	Objem vodiče primární cívky [mm ³]
V_{sek}	Objem vodiče sekundární cívky [mm ³]
x	Procentní rozptylová reaktance [%]
X_σ	Celková rozptylová reaktance [Ω]
$X_{1\sigma}$	Rozptylová reaktance primární cívky [Ω]
$X_{2\sigma}$	Rozptylová reaktance sekundární cívky [Ω]
$X'_{2\sigma}$	Rozptylová reaktance sekundární cívky přepočtena na primární str. [Ω]
X_μ	Hlavní magnetizační reaktance [Ω]
z_k	Poměrná impedance nakrátko [%]
ΔP_j	Joulové ztráty ve vinutí [W]

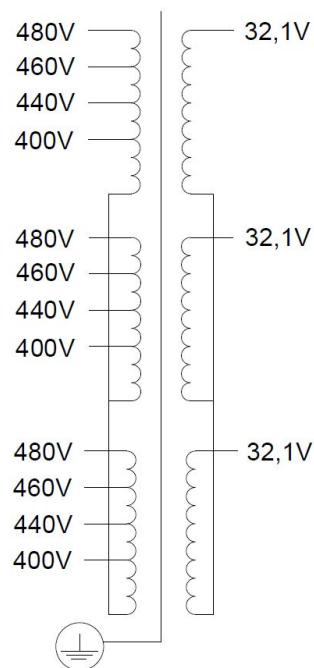
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe [W]
ΔP_p	Přídavné ztráty [W]
Φ_m	Maximální magnetický tok [Wb]
η	Účinnost transformátoru [%]
ρ_{plech}, ρ_{Cu}	Hustota plechů a mědi [kg/dm ³ , kg/m ³]
ρ_t	Měrný elektrický odpor při teplotě t [Ω.m]
δ	mezera mezi primární a sekundární cívkou [mm]
μ_o	Permeabilita vakua [H/m]
α_{20}	Teplotní součinitel elektrického odporu při teplotě 20 °C [1/K]
α	Koeficient přestupu tepla [W/m ²]

1 Návrh transformátoru

1.1 Zadání

Navrhněte 3f transformátor o celkovém výkonu 1600 VA, 50 Hz, 480...400/32,1 V, Yy0. Na primární straně jsou požadovány odbočky pro napětí 480, 460, 440 a 400 V. Transformátor bude provozován při teplotě $t_a=40$ °C a bude chlazen přirozeně vzduchem. Maximální povolený nárůst teploty je 75°C, tj. na 115°C. Izolační třída B. Je požadována účinnost minimálně 90%.

1.2 Výpočet



Obr. 1.1 Elektrické schéma navrhovaného transformátoru

1.2.1 Návrh magnetického obvodu

Pro výpočet minimálního průřezu jádra jedné cívky magnetického obvodu použijeme empirický vzorec [11]:

$$S_{Fe} = C \sqrt{\frac{S}{kf}} = 7 \cdot \sqrt{\frac{1600}{3 \cdot 50}} = 2286,2 \text{ mm}^2$$

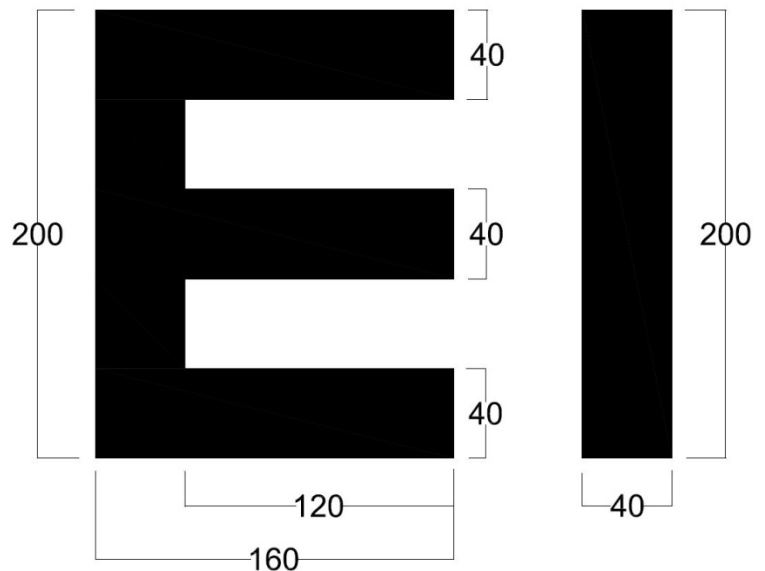
kde:

C pro vzduchové chlazení (6 – 8)

k pro 3f transformátor (3)

Nyní si musíme z katalogu (Příloha 1) zvolit rozměr plechů, které budou použity. Na základě hodnoty výkonu a zkušeností jsou zvoleny plechy 3 UI 120.

Dále se musí vybrat vhodná tloušťka magnetického obvodu. Tyto tloušťky jsou dány danými rozměry koster, které najdeme v katalogu příslušného výrobce (Příloha 2). Volíme takovou tloušťku, aby byla co možná nejbližší naší vypočtené hodnotě (nejbližší vyšší). Pozor si ještě musíme dát na fakt, že jednotlivé plechy jsou silné 0,5mm včetně laku, takže skutečný průřez samotného železa v jádře bude o to menší. To je dáno koeficientem plnění k, který je udáván výrobcem a většinou se pohybuje v rozmezí (0,92 – 0,97).



Obr.1.2 Plech 3 UI 120

Výpočet průřezu železa jednoho sloupku za použití plechů 3 UI 120 a kostry 3 UI 120/61:

$$S_{Fe} = 40 \cdot 61 = 2440 \text{ mm}^2$$

kde 40 mm je šířka jednoho sloupku (Obr. 1.2) a 61 mm je délka celého paketu.

Po zavedení koeficientu plnění $k_v=0,94$ vypočteme skutečný průřez sloupku:

$$S_{skut} = S_{Fe}k_v = 2440 \cdot 0,94 = 2293,6 \text{ mm}^2$$

Po vypočítání skutečného průřezu je zřejmé, že námi zvolená varianta je vyhovující pro naše použití a proto pro transformátor volíme variantu **3 UI 120/61**.

1.2.2 Návrh počtu závitů a použitých vodičů

Jako první si musíme zvolit magnetickou indukci B . Tato hodnota se volí na základě zkušeností a použitých plechů. V našem případě se hodnota maximální indukce volí v rozmezí 1,1 – 1,2 T.

V našem případě si zvolíme hodnotu magnetické indukce ve středu intervalu, tedy $B_m = 1,15 \text{ T}$.

Když máme hodnotu magnetické indukce a průřez magnetického obvodu, můžeme si spočítat hodnotu magnetického toku:

$$\Phi_m = B_m S_{skut} = 1,15 \cdot 2293,6 \cdot 10^{-6} = 2,638 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

1.2.2.1 Primární strana

Pro výpočet počtu potřebných závitů se používá vztah pro indukované napětí, do kterého dosadíme známé hodnoty a vyjádříme počet závitů N_1 .

$$U_1 = 4,44\Phi_m f N_1 \Rightarrow N_1 = \frac{U_1}{4,44\Phi_m f} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{4,44 \cdot 2,638 \cdot 10^{-3} \cdot 50} = 394,4 \text{ z.}$$

Volíme $N_1 = 395$ závitů pro jmenovitou odbočku 400V.

Výpočet skutečné jmenovité magnetické indukce:

$$B_n = \frac{U_1}{4,44S_{skut} f N_1} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{4,44 \cdot 2293,6 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 395} = 1,148 \text{ T} \approx 1,15 \text{ T}$$

Dopočet počtu závitů pro odbočky na primární straně.

$$440\text{V}: N_1 = \frac{440}{400} \cdot 395 = 434,5 \Rightarrow 435 \text{ závitů (+40 závitů vůči odbočce 400V)}$$

$$460\text{V}: N_1 = \frac{460}{400} \cdot 395 = 454,2 \Rightarrow 454 \text{ závitů (+19 závitů vůči odbočce 440V)}$$

$$480\text{V}: N_1 = \frac{480}{400} \cdot 395 = 474 \Rightarrow 474 \text{ závitů (+20 závitů vůči odbočce 460V)}$$

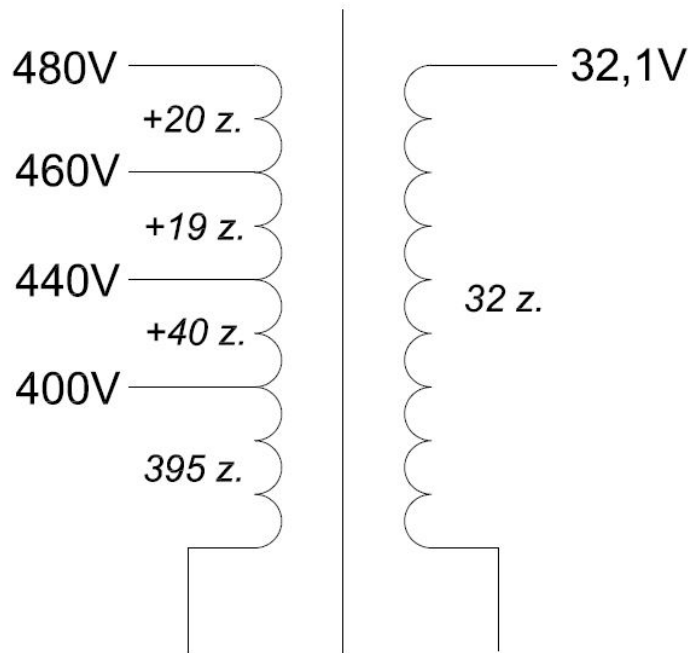
1.2.2.2 Sekundární strana

Výpočet závitů na sekundární straně se dopočte přes vztah:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow N_2 = \frac{U_2}{U_1} N_1 = \frac{32,1}{400} \cdot 395 = 31,7 \text{ z.}$$

Volíme $N_2 = 32$ závitů pro jmenovitou hodnotu sekundárního napětí 32,1 V.



Obr. 1.3 Počet závitů na PRI a SEC straně (1 fáze)

1.2.2.3 Volba průřezu vodičů

K určení průřezů vodičů je potřeba dopočítat několik chybějících parametrů transformátoru. Jako první je proud tekoucí sekundárním vinutím I_2 .

$$I_2 = \frac{S_{21f}}{U_2} = \frac{\frac{1600}{3}}{\frac{32,1}{\sqrt{3}}} = 28,77 \text{ A}$$

Dále je potřeba dopočítat proud tekoucí primárním vinutím I_1 , který lze dopočítat přes příkon transformátoru a napětí na primární straně. Průřez se počítá na odbočku s nejnižším napětím, protože při připojení na nejmenší napětí cívkou protéká nejvyšší proud.

K tomu, abychom ale dopočítali příkon transformátoru, potřebujeme znát účinnost. Ta se zpočátku výpočtu volí podle předem dané tabulky, která byla dána několikaletým vypořováním. (Tab. 1).

Tab. 1 Vypořádané účinnosti podle výkonů [5]

Výkon [VA]	účinnost [%]
1-2	70
2-5	75
5-20	80
20-75	85
75-200	88
200-600	90
600-1400	92
1400+	93

Z Tab. 1 si tedy volíme hodnotu účinnosti $\eta = 0,93$, tj. 93%. Nyní si můžeme vypočítat předpokládaný příkon transformátoru.

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta} = \frac{1600}{0,93} = 1720 \text{ VA}$$

A z příkonu dopočítat primární proud I_1 .

$$I_1 = \frac{S_{11}}{U_1} = \frac{\frac{1720}{3}}{\frac{400}{\sqrt{3}}} = 2,48 \text{ A}$$

Proudová hustota se u těchto transformátorů, které jsou chlazeny vzduchem, volí v rozsahu $2 - 3 \text{ A/mm}^2$, v krajních případech až 4 A/mm^2 . Za předpokladu, že víme, že vodič primární cívky bude mít zřetelně menší průřez, nežli je hloubka vniku při frekvenci 50 Hz, můžeme na primární straně zvolit větší proudovou hustotu. Z tohoto důvodu si tedy zvolíme:

Proudovou hustotu vodiče primární cívky: $J_1 = 3 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$

Proudovou hustotu vodiče sekundární cívky: $J_2 = 2 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$

Nyní si můžeme určit minimální průřezy vodičů.

Primární vodič:

$$J_1 = \frac{I_1}{S_1} \Rightarrow S_1 = \frac{I_1}{J_1} = \frac{2,48}{3} = 0,826 \text{ mm}^2$$

Sekundární vodič:

$$J_2 = \frac{I_2}{S_2} \Rightarrow S_2 = \frac{I_2}{J_2} = \frac{28,77}{2} = 14,38 \text{ mm}^2$$

Když máme spočtené minimální požadované průřezy vodičů, můžeme si z tabulky jmenovitých průměrů (Příloha 3) vybrat požadované vodiče.

Pro primární cívku zvolíme vodič o průměru $d_1 = 1,06 \text{ mm}$.

$$S_{v1} = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{\pi 1,06^2}{4} = 0,882 \text{ mm}^2$$

Protože platí, že $S_{v1} > S_1$ a je zároveň nejbližší S_1 , volíme pro primární cívku vodič o průměru $d_1 = 1,06 \text{ mm}$. Skutečná proudová hustota v primárním vodiči tedy bude:

$$J_1 = \frac{I_1}{S_{v1}} = \frac{2,48}{0,882} = 2,81 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

To samé provedeme pro sekundární vodič. Zvolíme si $d_2 = 4,25 \text{ mm}$.

$$S_{v2} = \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{\pi 4,25^2}{4} = 14,19 \text{ mm}^2$$

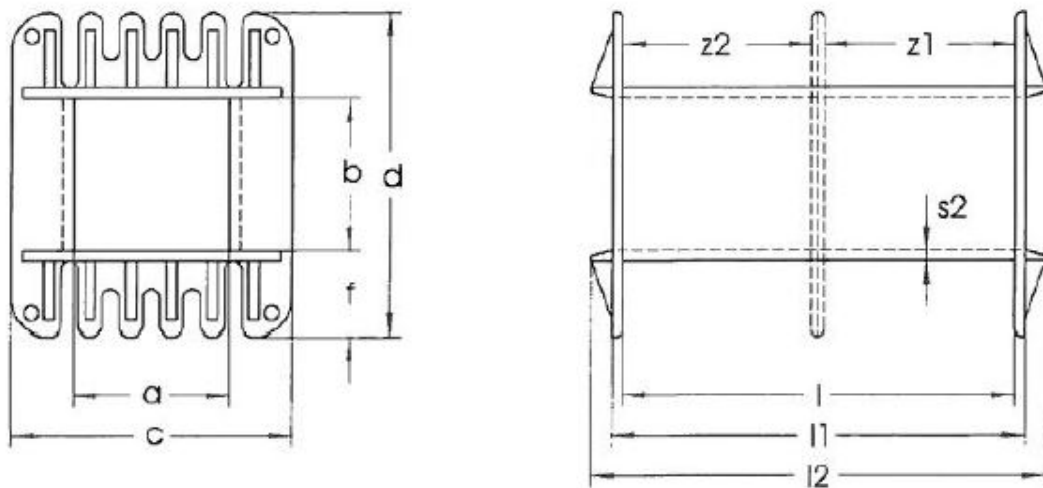
V tomto případě nám ale neplatí podmínka, že $S_{v2} > S_2$. V tomto případě však uděláme výjimku, protože nám nevádí minimální nárůst proudové hustoty ve vodiči a jako hlavní důvod je omezení prostoru v kostře transformátoru. Při volbě většího průřezu by se totiž mohlo stát, že by se nám vodiče do kostry nevešly a cívky sousedních sloupků by si

překážely. I z tohoto důvodu se většinou volí rezerva v zaplnění kostry cívky 5 – 10%. Pro sekundární cívku zvolíme tedy vodič o průměru $d_2 = 4,25 \text{ mm}$. Skutečná proudová hustota v sekundárním vodiči je:

$$J_2 = \frac{I_2}{S_{v2}} = \frac{28,77}{14,19} = 2,03 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

1.2.3 Zaplnění kostry cívky

Kontrola zaplnění kostry cívky je jedno z nejdůležitějších ověření, které se musí provést před samotnou výrobou transformátoru. Z rozměrů kostry (Obr. 1.4) a vodičů se výpočetně zjistí, zda se vodiče do kostry vejdou a zamezí se tak pozdnímu zjištění ve výrobě a případným finančním ztrátám.



Obr. 1.4 Kostra cívky [10]

Typ	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	f [mm]	l [mm]	l1 [mm]	l2 [mm]	s2 [mm]	z1 [mm]	z2 [mm]
UI 120/61 oD	41	61	78,6	105	22	114,5	118,5	127,2	2	-	-

Na Obr. 1.4 je uprostřed prostoru pro cívku naznačena přepážka, která rozděluje tento prostor na dva. Je to z důvodu, že výrobce nabízí tu samou kostru i v dvoukomorovém provedení. Jelikož však v tabulce rozměrů jsou hodnoty z1 a z2 vyškrtnuté, znamená to, že my máme kostru jednokomorovou a přepážka tam v našem případě není.

Z tabulky od výrobce vodičů (Příloha 3) si zjistíme skutečné průměry vodičů včetně laku. Z těchto rozměrů budeme vypočítávat skutečné zaplnění kostry.

Pro vodič primární cívky je průměr včetně laku $d_{1skut} = 1,124 \text{ mm}$

Pro vodič sekundární cívky je průměr včetně laku $d_{2skut} = 4,341 \text{ mm}$

Z důvodu manuální nedokonalosti navíjení cívky se z prostoru pro vinutí v kostře ubere na výšku 10%. Tento krok se provádí pro jistotu a vytvoření určité rezervy ve výpočtu.

$$l_p^* = 0,9l = 0,9 \cdot 114,5 = 103 \text{ mm}$$

1.2.3.1 Primární cívka

Určení počtu závitů na jednu vrstvu vinutí:

$$N_{11v} = \frac{l_p^*}{d_{1sku}} = \frac{103}{1,124} = 91,64 \Rightarrow 91 \text{ závitů}$$

Určení počtu vrstev cívky:

$$\text{početvrstev} = \frac{474}{91} = 5,15 \text{ vstvy}$$

Vzhledem ke zvolené toleranci 10% můžeme říct, že se nám cívka vejde do **5 vrstev**.

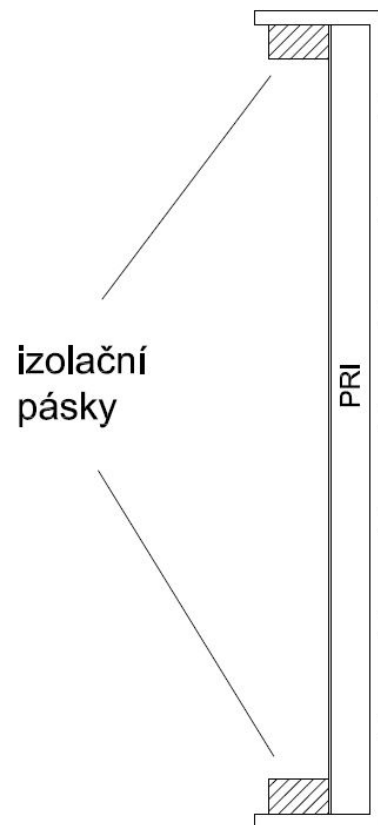
Celková tloušťka primární cívky:

$$b_1 = 5d_{1skut} = 5 \cdot 1,124 = 5,62 \text{ mm}$$

1.2.3.2 Sekundární cívka

Kvůli vytvoření minimální vzdálenosti mezi konci primární a sekundární cívky se do kostry na primární cívku namotává izolační páska, kvůli které je pro sekundární cívku ještě méně místa (Obr. 1.5). Tato minimální vzdálenost je dle normy ČSN EN 61558-1 ed. 2, kapitola 26, tab. 13 stanovena na 5mm a je vytvořena 5 mm širokou páskou namotanou na spodní i vrchní části kostry tak, aby pokryla celou sekundární cívku.

Na Obr. 1.5 je vidět řez kostry (jedna strana), kde je v prostoru pro cívky vidět část, kterou namotáním zabere primární cívka a 5 mm izolační pásky ve vrchní i spodní části kostry.



Obr. 1.5 Řez kostry cívky

Prostor pro sekundární cívku se spočte:

$$l_s = l - (2 \cdot 5) = l - 10 = 114,5 - 10 = 104,5 \text{ mm}$$

Jako u primární cívky se i zde uvažuje 10% rezerva:

$$l_s^* = 0,9l_s = 0,9 \cdot 104,5 = 94 \text{ mm}$$

Určení počtu závitů na jednu vrstvu vinutí:

$$N_{2_{1v}} = \frac{l_s^*}{d_{1skut}} = \frac{94}{4,341} = 21,65 \Rightarrow 21 \text{ závitů}$$

Určení počtu vrstev cívky:

$$\text{početvrstev} = \frac{32}{21} = 1,52 \text{ vstvy}$$

Sekundární cívka bude namotána ve **2 vrstvách**.

Celková tloušťka sekundární cívky je tedy:

$$b_2 = 2d_{2\text{sku}} = 2 \cdot 4,341 = 8,682 \text{ mm}$$

Nyní můžeme vypočítat, zda se nám kompletní vinutí transformátoru takto uspořádané vejde do námi zvolené kostry. Nejprve si určíme rozměry prostoru pro cívky v kostře. Jelikož s výškou kostry už jsme počítali, chybí nám ještě dopočítat hloubku kostry. Ta se dopočte podle hodnot z Obr. 1.4 jako:

$$\frac{c - a}{2} - s_2 = \frac{78,6 - 41}{2} - 2 = 16,8 \text{ mm}$$

Je důležité ještě vědět, že mezi primární a sekundární cívku se dává polyesterová izolační fólie s obchodním označením Mylar, která má tloušťku 0,4 mm a na povrch sekundární cívky dvě vrstvy ochranné fólie o celkové tloušťce 0,2 mm.

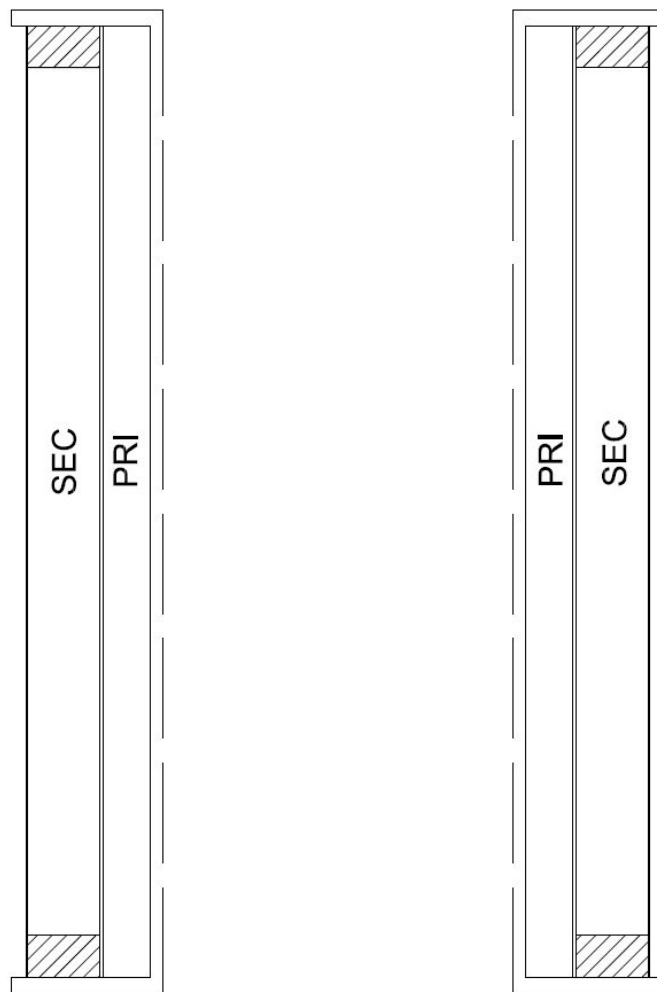
Výpočet celkového zaplnění kostry cívky je tedy:

$$5 \cdot 1,124 + 0,4 + 2 \cdot 4,341 + 0,2 = 5,62 + 0,4 + 8,682 + 0,2 = \mathbf{14,9 \text{ mm}}$$

Z výpočtu je tedy zřejmé, že se nám celkové vinutí transformátoru do kostry vejde i s malou rezervou. Jako poslední se dopočte procentuální zaplnění kostry cívky k_T .

$$k_T = \frac{14,9}{16,8} \cdot 100 = 88,7 \%$$

Na Obr. 1.6 je vidět řez kostry cívky transformátoru. Jsou zde zakresleny obě cívky vinutí, primární (PRI) i sekundární (SEC).



Obr. 1.6 Zaplnění kostry transformátoru

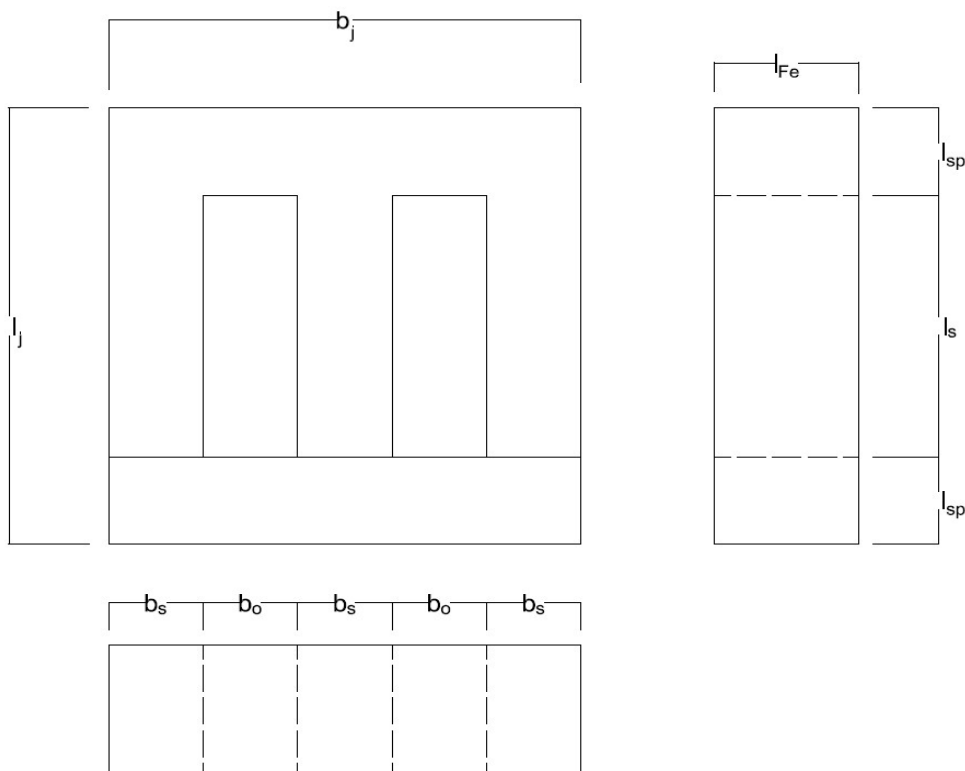
1.2.4 Výpočet hmotnosti

Výpočet hmotnosti transformátoru se provádí nejen pro základní informaci, kolik transformátor váží, ale i pro zjištění ztrát v železe. Výrobce transformátorových plechů totiž uvádí hodnotu ztrát na kilogram při určitém sycení. Výpočet celkové hmotnosti transformátoru je rozdělen do tří částí:

- Výpočet hmotnosti magnetického obvodu (železa)
- Výpočet hmotnosti vinutí
- Určení hmotnosti zbylých komponent transformátoru

1.2.4.1 Výpočet hmotnosti magnetického obvodu

Hustota použitých plechů je dle výrobce ... $\rho_{\text{plechu}} = 7,7 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$.



Obr. 1.7 Výkres magnetického obvodu

Typ paketu	b _o [mm]	b _s [mm]	b _j [mm]	l _s [mm]	l _{sp} [mm]	l _{Fe} [mm]	l _j [mm]
UI 120/61	40	40	200	120	40	61	200

Podle rozměrů dle Obr. 1.7 vypočteme objem magnetického obvodu.

Výpočet objemu magnetického obvodu vcelku (vč. oken):

$$V_{celku} = b_j \cdot l_j \cdot l_{Fe} = 200 \cdot 200 \cdot 61 = 2\,440\,000 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu jednoho okna:

$$V_{okna} = b_o \cdot l_s \cdot l_{Fe} = 40 \cdot 120 \cdot 61 = 292\,800 \text{ mm}^3$$

Objem obou oken:

$$V_{2ok} = 2V_{okna} = 2 \cdot 292\,800 = 585\,600 \text{ mm}^3$$

Celkový objem magnetického obvodu:

$$V_{jádra} = V_{celku} - V_{2oken} = 2\,440\,000 - 585\,600 = 1\,854\,400 \text{ mm}^3$$

Toto je však objem celého paketu magnetického obvodu. Musíme však brát v potaz i činitel plnění železa, přes který se dostaneme ke skutečnému objemu železa.

Jak už bylo psáno v kapitole 1.2.1, činitel plnění je dle výrobce pro tyto plechy $k_v=0,94$. Výpočet skutečného objemu železa je tedy:

$$V_{Fe} = 0,94V_{jádra} = 0,94 \cdot 1\,854\,400 = 1\,743\,136 \text{ mm}^3 = 1,743 \text{ dm}^3$$

Hmotnost jádra je tedy:

$$m_{Fe} = V_{Fe} \rho_{plech} = 1,743 \cdot 7,7 = \mathbf{13,5 \text{ kg}}$$

1.2.4.2 Výpočet hmotnosti vinutí

Hustota mědi je dána $\rho_{Cu} = 8\,960 \frac{kg}{m^3}$. K výpočtu hmotnosti vinutí je třeba znát objem vodiče cívky. K tomu, abychom ale zjistili objem vodiče, není potřeba pouze průřez daného vodiče, ale i jeho délka. Tu dokážeme dopočítat na základě již známých rozměrů a rozložení vinutí v kostře. Na Obr. 1.8 je řez kostrou a ilustrativní ukázka, jak jsou jednotlivé vrstvy vinutí v kostře poskládané. Na základě těchto informací dopočteme délky jednotlivých cívek.

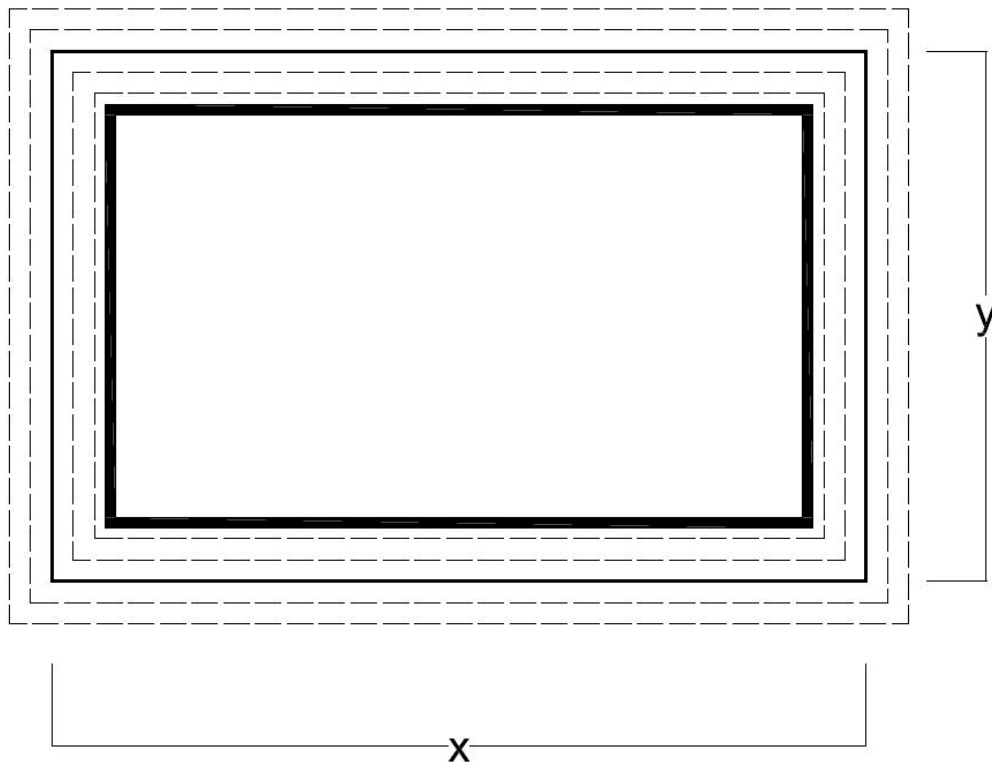


Obr. 1.8 Rozmístění jednotlivých vrstev vinutí v kostře

Primární cívka

Jelikož je primární cívka namotaná v pěti vrstvách, stačí nám vypočítat délku středního závitu, respektive délku závitu ve třetí vrstvě a přes počet závitů se dopočítat k celkové délce cívky.

Pro jednodušší výpočet si zavit zjednodušíme do tvaru obdélníku a výsledek poté přiblížíme skutečnosti ubráním 10% z celkové délky, jelikož ve skutečnosti jsou jednotlivé závity ve vrcholech zaobleny a tím pádem jsou závity kratší, než kdyby byly přesně obdélníkové. Tato hodnota byla vyzkoušena dlouholetými zkušenostmi a je to hodnota přibližná, pro naše potřeby však dostačující. Na Obr. 1.9 je vidět půdorys řezu kostry, na kterém je tučně zvýrazněn střední zavit, čárkovane ostatní a uprostřed je nejtučnější čarou znázorněn plast kostry, který se musí též uvažovat při zjišťování délek stran závitu.



Obr. 1.9 Půdorys kostry s naznačenými vrstvami vodičů primární cívky

Délka středního závitu se spočte jako:

$$l_s = 2x + 2y$$

kde

$$x = b + 2 \cdot s_2 + 5d_{1skut} = 61 + 2 \cdot 2 + 5 \cdot 1,124 = 70,62 \text{ mm}$$

slovně tento zápis respektuje vnitřní rozměr kostry pro plechy (Na Obr. 1.4 rozměr „b“), šířku plastu na obou stranách (s_2) a vodiče v první a druhé vrstvě z obou stran plus půlku z každé strany z třetí vrstvy, protože střední délka se bere uprostřed vodiče, dohromady tedy 5 vodičů. Obdobně se dopočítá i rozměr y , u kterého je jediný rozdíl v šířce vnitřního místa kostry pro plechy, kde je tento rozměr naznačen v Obr. 1.4 jako rozměr „a“.

$$y = a + 2 \cdot s_2 + 5d_{1skut} = 41 + 2 \cdot 2 + 5 \cdot 1,124 = 50,62 \text{ mm}$$

Délka středního závitu je tedy:

$$l_s = 2x + 2y = 2 \cdot 70,62 + 2 \cdot 50,62 = 242,48 \text{ mm}$$

Celková délka vodiče primární cívky se dopočte přes délku středního závitu a počet závitů primární cívky. Pozor je potřeba si dát na to, že počítáme celkovou hmotnost transformátoru, takže musíme uvažovat celkový počet závitů primární strany na maximálním rozsahu.

$$l_p = l_s N_1 = 242,48 \cdot 474 = 114\,935,5 \text{ mm} = 114,9 \text{ m}$$

Jak už bylo napsáno dříve, odečteme od výsledku 10% pro zpřesnění výsledku, skutečná délka vodiče primární cívky je tedy:

$$l_{pri} = 0,9l_p = 0,9 \cdot 114935,5 = 103\,441,95 = 103,4 \text{ m}$$

Když máme délku vodiče primární cívky, můžeme vypočítat objem vodiče a následně dopočítat hmotnost.

$$V_{pri} = \pi r^2 l_{pri} = \pi \left(\frac{1,06}{2}\right)^2 \cdot 103\,441,95 = 91\,235,8 \text{ mm}^3 = 9,12 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

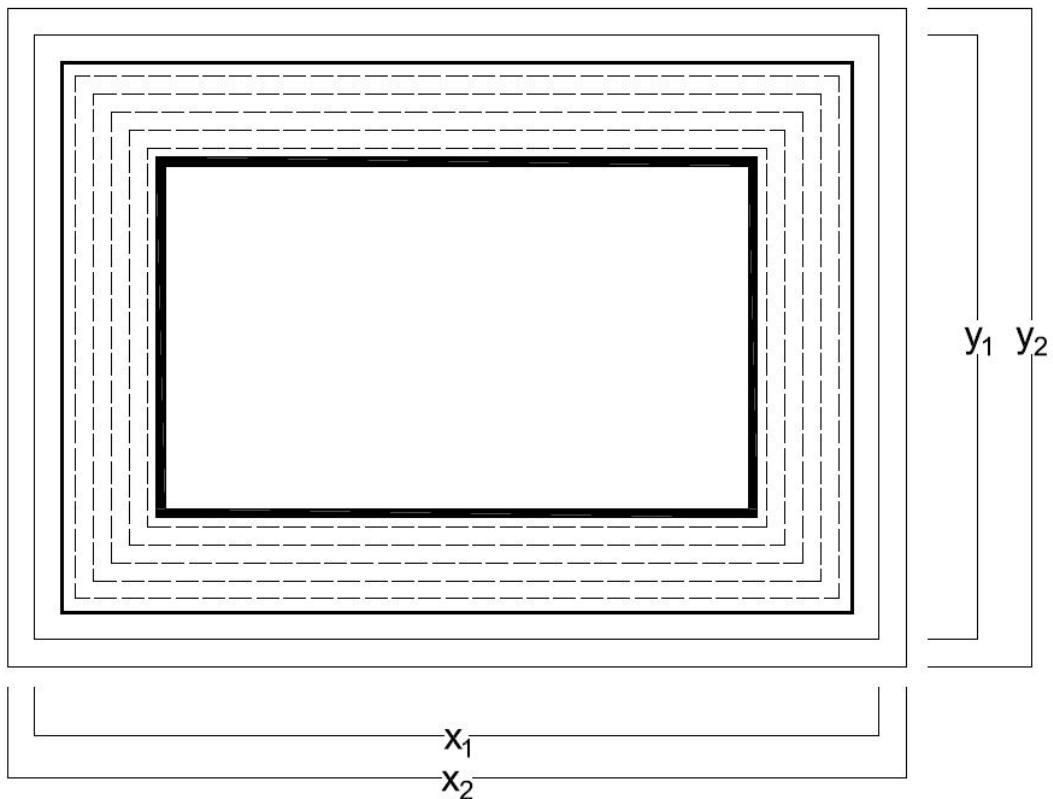
Hmotnost vodiče primární cívky se dopočte jako:

$$m_{pri} = V_{pri} \rho_{Cu} = 9,12 \cdot 10^{-5} \cdot 8960 = \mathbf{0,82 \text{ kg}}$$

Nyní můžeme obdobně dopočítat hmotnost vodiče sekundárního vinutí.

Sekundární cívka

Jelikož je sekundární cívka namotaná v jedné a půl vrstvě, nebudeme počítat jako u primární cívky přes střední délku, ale spočítáme délku obou závitů a přes příslušný počet závitů v každé vrstvě se dostaneme k celkové délce vodiče sekundární cívky.



Obr. 1.10 Půdorys kostrou s naznačenými vrstvami vodičů primární a sekundární cívky

Při výpočtu délek jednoho závitu obou vrstev se postupuje obdobně jako u předchozího případu u primární cívky, kde jsme počítali délku středního závitu. Na Obr. 1.10 jsou okótované rozměry obou vrstev sekundární cívky. Je třeba si navíc uvědomit, že kromě kostry a vodičů je třeba ještě při výpočtu uvažovat izolační fólii, která je 0,4 mm tlustá a která je mezi primární a sekundární cívkou. Na Obr. 1.10 je tato fólie znázorněna plnou tlustou čarou mezi vinutími.

Délka jednoho závitu v první vrstvě sekundární cívky se spočte jako:

$$l_{s1v} = 2x_1 + 2y_1$$

kde

$$\begin{aligned}x_1 &= b + 2 \cdot s_2 + (2 \cdot 5d_{1skut}) + 0,4 \cdot 2 + d_{2sku} \\ &= 61 + 2 \cdot 2 + (2 \cdot 5 \cdot 1,124) + 0,4 \cdot 2 + 4,341 = 81,38 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}y_1 &= a + 2 \cdot s_2 + (2 \cdot 5d_{1skut}) + 0,4 \cdot 2 + d_{2sku} \\ &= 41 + 2 \cdot 2 + (2 \cdot 5 \cdot 1,124) + 0,4 \cdot 2 + 4,341 = 61,38 \text{ mm}\end{aligned}$$

Délka závitu první vrstvy sekundární cívky je

$$l_{s1v} = 2x_1 + 2y_1 = 2 \cdot 81,38 + 2 \cdot 61,38 = 285,52 \text{ mm}$$

Nyní vypočteme délku druhé vrstvy. Výpočet je skoro identický s jediným rozdílem, že se na každé straně posouváme o jeden sekundární vodič dál, takže každá strana závitu bude delší o dvojnásobek průměru vodiče.

Délka jednoho závitu ve druhé vrstvě sekundární cívky se spočte jako:

$$l_{s2v} = 2x_2 + 2y_2$$

kde

$$\begin{aligned}x_2 &= b + 2 \cdot s_2 + (2 \cdot 5d_{1skut}) + 0,4 \cdot 2 + 3d_{2skut} \\ &= 61 + 2 \cdot 2 + (2 \cdot 5 \cdot 1,124) + 0,4 \cdot 2 + 3 \cdot 4,341 = 90,06 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}y_2 &= a + 2 \cdot s_2 + (2 \cdot 5d_{1skut}) + 0,4 \cdot 2 + 3d_{2skut} \\ &= 41 + 2 \cdot 2 + (2 \cdot 5 \cdot 1,124) + 0,4 \cdot 2 + 3 \cdot 4,341 = 70,06 \text{ mm}\end{aligned}$$

Délka závitu druhé vrstvy sekundární cívky je:

$$l_{s2v} = 2x_2 + 2y_2 = 2 \cdot 90,06 + 2 \cdot 70,06 = 320,24 \text{ mm}$$

Když máme vypočítané délky závitů obou vrstev vinutí, můžeme přes daný počet závitů v každé vrstvě vypočítat celkovou délku vodiče sekundární cívky.

Celková délka vodiče první vrstvy cívky:

$$l_{1s} = l_{s1v} N_{21} = 285,52 \cdot 21 = 5995,92 \text{ mm}$$

kde N_{21} je počet závitů v první vrstvě.

Celková délka vodiče druhé vrstvy cívky:

$$l_{2s} = l_{s2v} N_{22} = 320,24 \cdot 11 = 3522,64 \text{ mm}$$

kde N_{22} je počet závitů v druhé vrstvě. Pokud víme, že celkově je na sekundární straně 32 závitů a na jednu vrstvu připadá 21 závitů, ve druhé vrstvě bude zbytek, tj. $32 - 21 = 11$ závitů.

Celková délka vodiče sekundární cívky:

$$l_s = l_{1s} + l_{2s} = 5995,92 + 3522,64 = 9518,56 \text{ mm} = 9,52 \text{ m}$$

Nyní jako u primárního vodiče odebereme 10% pro zpřesnění délky vodiče.

$$l_{sek} = 0,9l_s = 0,9 \cdot 9518,56 = 8566,7 \text{ mm} = 8,57 \text{ m}$$

Nyní můžeme přes objem a hustotu mědi dopočítat hmotnost vodiče sekundární cívky.

$$V_{sek} = \pi r^2 l_{sek} = \pi \left(\frac{4,25}{2}\right)^2 \cdot 8566,7 = 121\,529,38 \text{ mm}^3 = 1,215 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Hmotnost vodiče sekundární cívky se dopočte jako:

$$m_{sek} = V_{sek}\rho_{Cu} = 1,215 \cdot 10^{-4} \cdot 8960 = \mathbf{1,1 \text{ kg}}$$

Když máme vypočítané hmotnosti obou cívek, můžeme určit celkovou hmotnost mědi v transformátoru. Musíme si uvědomit, že transformátor je tří fázový, takže obě cívky, jejichž hmotnost jsme spočetli, jsou zde třikrát. Celková hmotnost mědi je tedy:

$$m_{Cu} = 3(m_{pri} + m_{sek}) = 3 \cdot (0,82 + 1,1) = 3 \cdot 1,92 = \mathbf{5,76 \text{ kg}}$$

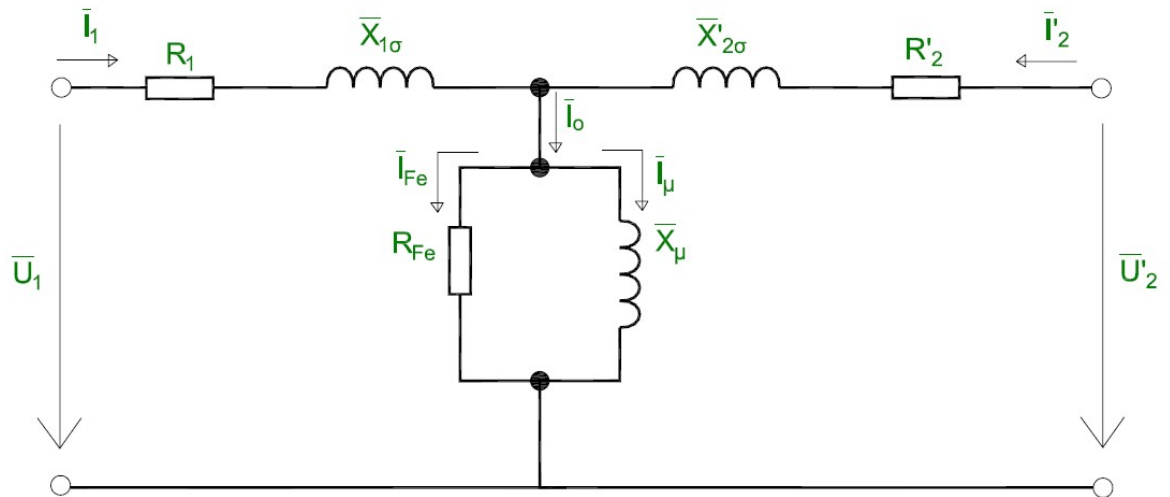
Když už známe hmotnost magnetického obvodu i mědi, můžeme spočítat celkovou hmotnost transformátoru. K těmto hodnotám ještě přičteme hmotnost ostatních komponent transformátoru, jako je připevňující patka a další. Hmotnost těchto komponent je v součtu 0,7 kg.

Celková hmotnost transformátoru je:

$$m_{celk.} = m_{Fe} + m_{Cu} + 0,7 = 13,5 + 5,76 + 0,7 = 19,96 \text{ kg} \Rightarrow \mathbf{20 \text{ kg}}$$

1.2.5 Výpočet parametrů náhradního schématu

Náhradní schéma transformátoru (Obr. 1.11) se skládá z podélné a příčné větve. Podélná větev reprezentuje primární a sekundární vinutí, kde R_1 a R_2' jsou odpory primárního a sekundárního vinutí a $X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}'$ jsou rozptylové reaktance. Příčná větev je složena z fiktivního odporu R_{Fe} , který reprezentuje ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní a dále z magnetizační reaktance X_{μ} , která reprezentuje magnetizaci magnetického jádra.



Obr. 1.11 Náhradní schéma transformátoru

1.2.5.1 Výpočet odporů R_1 a R_2

Než začneme počítat hodnoty odporů vodičů, je potřeba přepočítat si hodnotu měrného elektrického odporu ρ_{20} na hodnotu teploty okolí $t_a = 40^\circ\text{C}$, pro kterou budeme počítat parametry náhradního schématu a při provozní jmenovité teplotě 105°C , ze které budeme dopočítávat reálné ztráty a účinnost za provozu při jmenovité zátěži. Přepočet měrného elektrického odporu se vypočte jako:

$$\rho_t = \rho_{20}(1 + \alpha_{20}\Delta t)$$

kde

ρ_{20}měrný elektrický odpor při teplotě 20°C (pro měď $\rho_{20} = 0,0178 \mu\Omega \cdot \text{m}$)

α_{20} teplotní součinitel elektrického odporu při teplotě 20°C (pro měď $0,00393 \text{ K}^{-1}$)

Δt rozdíl teplot ($t_2 - t_1$) [$^\circ\text{C}$]

Výpočet měrného elektrického odporu při teplotě 40°C a 105°C je tedy:

$$\rho_{40} = \rho_{20}(1 + \alpha_{20}\Delta t) = 0,0178 \cdot (1 + 0,00393 \cdot (40 - 20)) = 0,0191 \mu\Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho_{105} = \rho_{20}(1 + \alpha_{20}\Delta t) = 0,0178 \cdot (1 + 0,00393 \cdot (105 - 20)) = 0,0237 \mu\Omega \cdot m$$

Vzhledem k tomu, že počítáme hodnoty parametrů náhradního schématu pro jmenovitou hodnotu 400V na primární straně, musíme si dopočítat délku vodiče pro tuto odbočku, jelikož známe pouze celkovou délku vodiče, která odpovídá odbočce na maximálním rozsahu, tedy 480V.

$$l_{p40} = \frac{400}{480} l_{pri} = \frac{400}{480} \cdot 103,4 = 86,16 m$$

Hodnoty odporů při referenční teplotě 40 °C

Výpočet odporu primárního vinutí:

$$R_1 = \rho_{40} \frac{l_{p400}}{S_{v1}} = 0,0191 \cdot \frac{86,16}{0,882} = 1,86 \Omega$$

Výpočet odporu sekundárního vinutí:

$$R_2 = \rho_{40} \frac{l_{sek}}{S_{v2}} = 0,0191 \cdot \frac{8,57}{14,19} = 0,012 \Omega$$

Přepočet odporu sekundárního vinutí na primární stranu se vypočte přes převod transformátoru ,k' a skutečnou hodnotu odporu R_2 při 20 °C následovně.

$$R'_2 = k^2 R_2 = \left(\frac{400}{32,1}\right)^2 \cdot 0,012 = 1,86 \Omega$$

Hodnoty odporů při jmenovité teplotě 105 °C při jmenovitém zatížení

Výpočet odporu primárního vinutí:

$$R_{1n} = \rho_{105} \frac{l_{p400}}{S_{v1}} = 0,0237 \cdot \frac{86,16}{0,882} = 2,32 \Omega$$

Výpočet odporu sekundárního vinutí:

$$R_{2n} = \rho_{105} \frac{l_{sek}}{S_{v2}} = 0,0237 \cdot \frac{8,57}{14,19} = 0,015 \Omega$$

Obdobně jako u hodnot při 20 °C provedeme přepočítání odporu sekundárního vinutí na primární:

$$R'_{2n} = k^2 R_{2n} = \left(\frac{400}{32,1}\right)^2 \cdot 0,014 = 2,32 \Omega$$

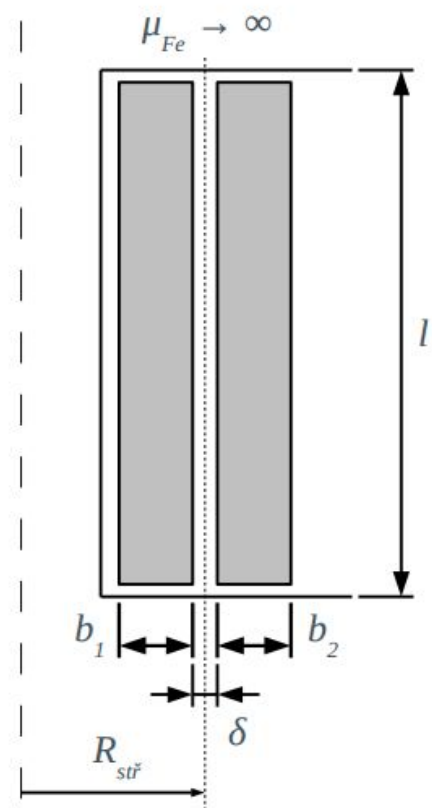
1.2.5.2 Výpočet rozptylových reaktancí $X_{1\sigma}$ a $X'_{2\sigma}$

Výpočet rozptylových reaktancí provedeme přes vzorec pro výpočet rozptylové indukčnosti. K výpočtu použijeme již známé geometrické rozměry cívek a magnetického obvodu podle Obr. 1.12.

Obecný vzorec pro výpočet rozptylové indukčnosti je [7]:

$$L_{\sigma} = \mu_o 2\pi R_{stř} \frac{N^2}{l} \left(\frac{b_1}{3} + \delta + \frac{b_2}{3}\right)$$

Tento vzorec je však pro výpočet válcové cívky, kdežto cívky, pro které hodnotu rozptylové indukčnosti počítáme, jsou spíše kvádrové. Musíme proto hodnotu $R_{stř}$ přepočítat. Výpočet provedeme pomocí rovnosti ploch, z čehož poté dopočítáme poloměr náhradního kruhového průřezu.



Obr. 1.12 Geometrické rozměry vinutí [7]

Rozměry stran a výpočet plochy mezi vinutími se vypočtou jako:

$$x = 2b_1 + \delta + (2 \cdot 2) + a = 2 \cdot 5,62 + 0,4 + 4 + 41 = 56,64 \text{ mm}$$

$$y = 2b_1 + \delta + (2 \cdot 2) + b = 2 \cdot 5,62 + 0,4 + 4 + 61 = 76,64 \text{ mm}$$

$$S_{\square} = xy = 56,64 \cdot 76,64 = 4340,89 \text{ mm}^2$$

Přes rovnost ploch teď dopočítáme $R_{stř}$ náhradního kruhového průřezu:

$$S_{\square} = S_{\circ}$$

$$4340,89 = \pi R_{stř}^2$$

$$\sqrt{\left(\frac{4340,89}{\pi}\right)} = R_{stř} = 37,17 \text{ mm}$$

Nyní, když víme hodnotu $R_{stř}$, můžeme spočítat hodnoty rozptylových indukčností obou cívek.

Výpočet rozptylové indukčnosti primární cívky:

$$\begin{aligned} L_{1\sigma} &= \mu_o 2\pi R_{stř} \frac{N_1^2}{h_c} \left(\frac{b_1}{3} + \delta + \frac{b_2}{3}\right) \\ &= 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2\pi \cdot 0,03717 \cdot \frac{395^2}{0,12} \cdot \left(\frac{0,00562}{3} + 0,0004 + \frac{0,008682}{3}\right) \\ &= 1,972 \cdot 10^{-3} \text{ H} \end{aligned}$$

Rozptylová reaktance se dopočte jako:

$$X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma} = 2\pi f L_{1\sigma} = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,972 \cdot 10^{-3} = 0,62 \Omega$$

Výpočet rozptylové indukčnosti sekundární cívky:

$$\begin{aligned} L_{2\sigma} &= \mu_0 2\pi R_{stř} \frac{N_2^2}{h_c} \left(\frac{b_1}{3} + \delta + \frac{b_2}{3} \right) \\ &= 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2\pi \cdot 0,03717 \cdot \frac{32^2}{0,12} \cdot \left(\frac{0,00562}{3} + 0,0004 + \frac{0,008682}{3} \right) \\ &= 1,294 \cdot 10^{-5} H \end{aligned}$$

$$X_{2\sigma} = \omega L_{2\sigma} = 2\pi f L_{2\sigma} = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,294 \cdot 10^{-5} = 4,065 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Obdobně jako u odporů se rozptylová reaktance sekundární cívky přepočítá na primární stranu:

$$X'_{2\sigma} = k^2 X_{2\sigma} = \left(\frac{400}{32,1} \right)^2 \cdot 4,065 \cdot 10^{-3} = 0,62 \Omega$$

1.2.5.3 Výpočet procentní impedance nakrátko transformátoru

Výpočet procentní impedance nakrátko se provádí přes procentní odpor a procentní reaktanci transformátoru. Tímto výpočtem navíc získáme hodnotu procentního napětí nakrátko, jelikož jsou tyto hodnoty transformátoru shodné, což je velmi důležitá hodnota transformátoru a uvádí se jako štítková hodnota.

Procentní odpor při referenční teplotě 40 °C

Před výpočtem procentního odporu je třeba si vypočítat hodnotu ekvivalentního odporu vztaženého k primární straně:

$$R = R_1 + R'_2 = R_1 + R_2 k^2 = 1,86 + 0,012 \cdot \left(\frac{400}{32,1} \right)^2 = 3,72 \Omega$$

Hodnota procentního odporu je tedy:

$$r = \frac{I_1 R}{U_1} \cdot 100 = \frac{2,48 \cdot 3,72}{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)} \cdot 100 = 3,97 \%$$

Procentní odpor při jmenovité teplotě 105 °C při jmenovitém zatížení

Před výpočtem procentního odporu je třeba si vypočítat hodnotu ekvivalentního odporu vztaženého k primární straně:

$$R_n = R_{1n} + R'_{2n} = R_{1n} + R_{2n} k^2 = 2,32 + 0,015 \cdot \left(\frac{400}{32,1}\right)^2 = 4,64 \Omega$$

Hodnota procentního odporu je tedy:

$$r_n = \frac{I_1 R_n}{U_1} \cdot 100 = \frac{2,48 \cdot 4,64}{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)} \cdot 100 = 4,98 \%$$

Procentní reaktance:

Pro výpočet procentní reaktance použijeme vzorec, který je publikován v [1], ze kterého nám vyjde rovnou hodnota v procentech.

$$x = \left(\frac{2\pi f \cdot L_{mt}(NI)}{h_c E_t} \left(a + \frac{b_1 + b_2}{3} \right) \right) \cdot 100$$

kde

L_{mt} je délka středního závitu celkového vinutí, h_c je střední výška cívek a E_t je hodnota napětí na závit.

K výpočtu délky středního závitu celkového vinutí použijeme již známé hodnoty středních závitů obou cívek, které jsme počítali v kapitole 1.2.4.2, zpřesníme tyto délky opět tím, že je o 10% zmenšíme a vypočteme jejich průměr.

$$L_{mt} = \frac{l_{sp} + l_{ss}}{2} = \frac{218,23 + 272,59}{2} = 245,4 \text{ mm}$$

Střední výška cívek se spočte obdobně, vezmou se výšky obou cívek a vypočte je průměr.

$$h_c = \frac{h_{c1} + h_{c2}}{2} = \frac{114,5 + 104,5}{2} = 109,5 \text{ mm}$$

Hodnota (NI) se použije buď z primární strany, nebo sekundární. V ideálním případě by tyto hodnoty měli být stejné, v našem případě se mírně liší, avšak na výsledek má tento rozdíl nepatrný vliv.

Napětí na závit E_t dopočteme jako:

$$E_t = \frac{U_1}{N_1} = \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)}{395} = 0,58 \frac{\text{V}}{\text{záv.}}$$

Výpočet procentní reaktance je tedy:

$$\begin{aligned} x &= \left(\frac{2\pi f \mu_o L_{mt} (NI)}{h_c E_t} \left(a + \frac{b_1 + b_2}{3} \right) \cdot 100 \right) \\ &= \left(\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,2454 \cdot (395 \cdot 2,48)}{0,1095 \cdot 0,58} \right) \\ &\quad \cdot \left(0,0004 + \frac{0,00562 + 0,008682}{3} \right) \cdot 100 = 0,77 \% \end{aligned}$$

Procentní impedance je tedy:

$$z_k = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{3,74^2 + 0,77^2} = 3,81 \% = u_k$$

1.2.5.4 Výpočet ztrát a účinnosti transformátoru

Ztráty v transformátoru dělíme na:

- Joulovy ztráty ve vinutí ΔP_j
- Ztráty v železe ΔP_{Fe}
- Přídavné ztráty ΔP_p

Joulovy ztráty ve vinutí spočteme užitím klasického vzorce a dosazením známých hodnot odporů vodičů a protékajících proudů. Joulovy ztráty se počítají z hodnot při jmenovitém zatížení transformátoru při teplotě 105°C k zjištění skutečných ztrát a účinnosti transformátoru.

Pro primární cívku je hodnota Joulových ztrát:

$$\Delta P_{jp} = R_{1n} I_1^2 = 2,32 \cdot 2,48^2 = 14,27 \text{ W}$$

Pro sekundární cívku:

$$\Delta P_{js} = R_{2n} I_2^2 = 0,015 \cdot 28,8^2 = 12,44 \text{ W}$$

Jelikož máme transformátor 3-fázový, musíme tyto hodnoty ztrát vynásobit třemi, protože máme každou cívku 3-krát. Celková hodnota Joulových ztrát je tedy:

$$\Delta P_j = 3(\Delta P_{jp} + \Delta P_{js}) = 3 \cdot (14,27 + 12,44) = 80,13 \text{ W}$$

Ztráty v železe se určují pomocí hmotnosti magnetického obvodu a charakteristiky k plechům, kterou dodává výrobce. Podle námi navržené indukce v jádře si na charakteristice (Příloha 4) najdeme, jaké jsou při této indukci ztráty vztažené na 1 kg železa.

Z charakteristiky (Příloha 4) jsme zjistili, že v námi použitým typu plechů (M530-50A) jsou ztráty $\Delta p_{Fe} = 2,5 \text{ W/kg}$. Celkové ztráty v železe jsou tedy:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta p_{Fe} m_{Fe} = 2,5 \cdot 13,5 = 33,75 \text{ W}$$

Ztráty přídatné jsou ztráty, které respektují různé dodatečné děje v transformátoru. Jejich velikost se volí zhruba 1 – 1,5% z celkového výkonu transformátoru.

$$\Delta P_p = 0,015 \cdot 1600 = 24 \text{ W}$$

Celkové ztráty v transformátoru jsou:

$$\Delta P = \Delta P_j + \Delta P_{Fe} + \Delta P_p = 80,13 + 33,75 + 24 = 137,88 \text{ W}$$

Účinnost transformátoru se dopočte přes celkové ztráty a celkový výkon transformátoru jako:

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P} \cdot 100 = \frac{1600}{1600 + 137,88} \cdot 100 = 92,1 \%$$

1.2.5.5 Výpočet proudu naprázdno a parametrů R_{Fe} a X_μ

Z celkových ztrát v železe si můžeme dopočítat hodnotu proudu I_{Fe} .

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{3U_n} = \frac{33,75}{3 \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)} = 0,049 \text{ A}$$

Nyní si z charakteristiky (Příloha 5) zjistíme, jak velká musí být magnetizace jádra, aby v jádře byla magnetická indukce 1,15 T. Z charakteristiky pro námi zvolené plechy (M530-50A) magnetického obvodu je vidět, že je hodnota magnetizace = 4,5 VA/kg. Nyní si spočteme celkovou magnetizaci magnetického obvodu, což je vlastně hodnota jalového výkonu potřebného k namagnetování železa.

$$Q_{\mu} = 4,5m_{Fe} = 4,5 \cdot 13,5 = 60,75 \text{ VA}$$

Když máme celkovou hodnotu potřebné magnetizace, můžeme dopočítat hodnotu magnetizačního proudu I_{μ} .

$$I_{\mu} = \frac{Q_{\mu}}{3U_n} = \frac{60,75}{3 \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)} = 0,087 \text{ A}$$

Když známe obě složky proudu naprázdno, můžeme samotný proud naprázdno spočítat jako:

$$I_0 = \sqrt{(I_{Fe})^2 + (I_{\mu})^2} = \sqrt{(0,049)^2 + (0,087)^2} = 0,095 \text{ A}$$

Jako štítková hodnota u transformátorů místo hodnoty proudu naprázdno udává jeho procentní hodnota. Procentní proud naprázdno se spočte jako:

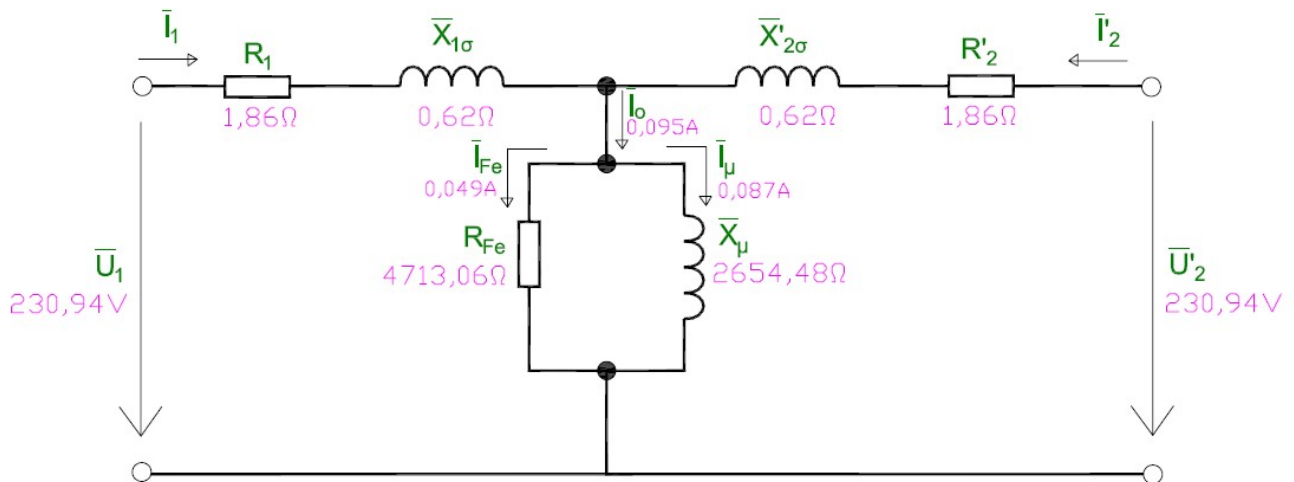
$$i_0 = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100 = \frac{0,095}{2,48} \cdot 100 = 3,83 \%$$

Když známe proud naprázdno a obě jeho složky, můžeme už dopočítat hodnoty parametrů náhradního odporu železa R_{Fe} a magnetizační reaktance X_{μ} .

$$R_{Fe} = \frac{U_{1n}}{I_{Fe}} = \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)}{0,049} = 4713,06 \Omega$$

$$X_{\mu} = \frac{U_{1n}}{I_{\mu}} = \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)}{0,087} = 2654,48 \Omega$$

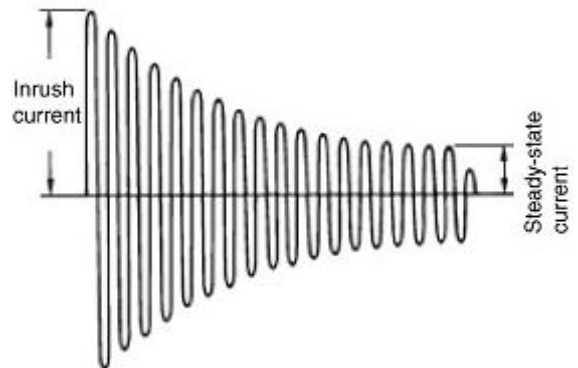
Hodnoty parametrů náhradního schématu získané výpočtem



Obr. 1.13 Náhradní schéma transformátoru vč. spočítaných hodnot náhradních parametrů

1.2.6 Výpočet zapínacího proudu transformátoru

Z důvodu návržení správného jisticího prvku se musí vypočítat zapínací proud transformátoru. Je to proud, který při zapnutí transformátoru může dosahovat několikanásobku hodnoty jmenovitého proudu a může se blížit až k velikosti zkratového proudu. Celkem zásadní roli ve velikosti zapínacího proudu hrají dvě okolnosti. V jaké části sinusovky napětí se transformátor připojí a jestli byl magnetický obvod před zapnutím částečně zmagnetován.



Obr. 1.14 Ukázka průběhu zapínacího proudu[8]

Jelikož průběh zkratového proudu je střídavý a časem se jeho velikost postupně zmenšuje (Obr. 1.14), je pro nás nejdůležitější spočítat si velikost první amplitudy. Jak už zde bylo napsáno, jeho velikost se blíží hodnotě proudu zkratového a tak je jeho velikost omezena pouze impedancí nakrátko obvodu. Vztah pro výpočet velikosti první amplitudy zapínacího proudu [6]:

$$i_{peak} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{X^2 + R^2}} \left(\frac{2B_N + B_r - B_S}{B_N} \right)$$

kde

B_N jmenovitá magnetická indukce [T]

B_r remanentní (zbytková) magnetická indukce (zhruba $0,8B_N$) [T]

B_S saturační magnetická indukce [T]

Výpočet amplitudy zapínacího proudu je tedy:

$$i_{peak} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{X^2 + R^2}} \left(\frac{2B_N + B_r - B_S}{B_N} \right) = \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)}{\sqrt{(1,24^2) + (3,72^2)}} \cdot \left(\frac{2 \cdot 1,15 + 0,92 - 1,35}{1,15} \right) \\ = 91,18 \text{ A}$$

Z důvodu výběru správného jističe si dopočteme z této maximální hodnoty efektivní hodnotu, jelikož jistič nereaguje na maximální, nýbrž na efektivní hodnotu tohoto proudu a maximální velikost tohoto proudu je uvedena v katalogu u jističe spolu s maximálním jmenovitým proudem:

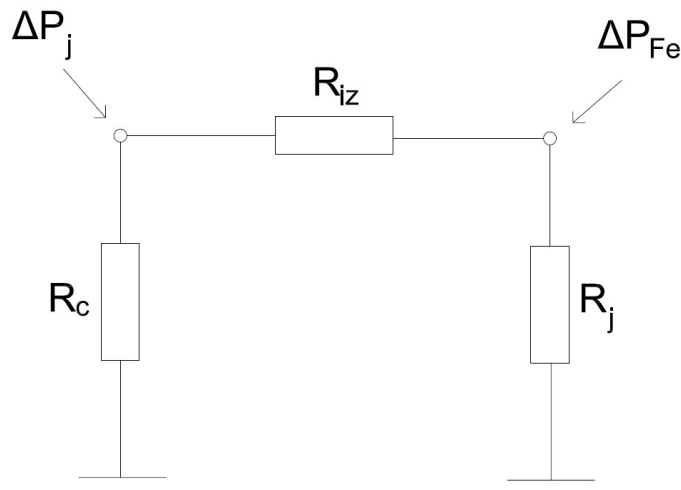
$$i_{ef} = \frac{i_{peak}}{\sqrt{2}} = \frac{91,18}{\sqrt{2}} = 64,47 \text{ A}$$

Dle této hodnoty a hodnoty jmenovitého proudu primární strany byly dle katalogu (Příloha 4) doporučeny tyto jističe. Jistič od společnosti Siemens s označením 3RV2711-1DD10; $I_N = 3,2 \text{ A}$, $I_{overcurrent} = 65 \text{ A}$, popřípadě PKZM0-4-T, $I_N = 2,7 \text{ A}$ od firmy EATON.

1.2.7 Výpočet oteplení transformátoru

Nyní provedeme výpočet oteplení cívek a magnetického jádra. Výpočet se provádí z důvodu zjištění, zda teplota nepřekročí maximální danou mez, která je daná izolační třídou použité izolace.

Na Obr. 1.15 můžeme vidět schéma zjednodušeného tepelného výpočtu transformátoru, na kterém vidíme tepelný odpor cívky R_c , jádra R_j a tepelný odpor izolace R_{iz} mezi. Než začneme počítat, je potřeba zmínit, že předpokládáme velikost R_{iz} tak velkou, že nebude probíhat k tepelné výměně mezi cívkou a jádrem. Jinak řečeno, bude cívka a jádro ideálně tepelně odizolované. To nám umožní vypočítat oteplení cívky a jádra zvlášť bez uvažování toho, že se jedna část chladí do druhé a výpočet by se zkomplikoval. V případě, že by předpoklad nebyl dodržen, bude probíhat tepelná výměna i mezi magnetickým obvodem a vinutím, přičemž teplejší část se bude chladit do chladnější části, díky čemuž maximální teplota celku poklesne. Z tohoto pohledu se tedy uvedeným postupem určuje nejhorší možný případ oteplení. Tato skutečnost bude poté ověřena měřením.



Obr. 1.15 Zjednodušené schéma pro tepelný výpočet transformátoru

Výpočet oteplení cívek

Jako první si spočteme velikost celkové ochlazovací plochy cívek. Ta se skládá z šesti předních čel cívek a dvou krajních částí cívek. Celková ochlazovací plocha je tedy:

$$S_C = 6(y_2 \cdot h_c) + 2(x_2 \cdot h_c) = 6(70,06 \cdot 120) + 2(90,06 \cdot 120) = 72057,6 \text{ mm}^2 \\ = 0,072 \text{ m}^2$$

Volíme: $\alpha = 15 \frac{W}{m^2K}$

$$R_C = \alpha S_C = 15 \cdot 0,072 = 1,08 \frac{W}{K}$$

Výpočet oteplení cívek:

$$\Delta\vartheta_C = \frac{\Delta P_j}{R_C} = \frac{80,13}{1,08} = 74 \text{ K}$$

Teplota cívek by měla tedy podle výpočtu být:

$$t_c = t_a + \Delta\vartheta = 40 + 74 = 114 \text{ }^\circ\text{C}$$

Výpočet oteplení magnetického jádra

Jako u výpočtu oteplení cívek si nejprve spočteme chladicí plochu magnetického obvodu. Ta se skládá ze všech viditelných částí magnetického obvodu, tedy kromě těch ploch, na kterých jsou nasazeny kostry s cívkami. Z důvodu špatného proudění vzduchu pod transformátorem (malého místa) budeme uvažovat, že zde vzduch proudí velmi špatně a nebudeme spodní plochu železa započítávat jako chladicí plochu. Výpočet chladicí plochy je tedy:

$$S_j = 4(40 \cdot 61) + 4(200 \cdot 40) + (200 \cdot 61) = 53960 \text{ mm}^2 = 0,054 \text{ m}^2$$

Jako u cívek volíme: $\alpha = 15 \frac{W}{m^2 K}$

$$R_j = \alpha S_j = 15 \cdot 0,054 = 0,81 \frac{W}{K}$$

Oteplení magnetického jádra je tedy:

$$\Delta\vartheta_j = \frac{\Delta P_{Fe}}{R_j} = \frac{33,75}{0,81} = 41,6 K$$

Teplota magnetického obvodu by měla podle výpočtu být tedy:

$$t_c = t_a + \Delta\vartheta = 40 + 41,6 = 81,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vzhledem k tomu, že z tepelného výpočtu vyšel poměrně značný teplotní gradient (32 °C), lze předpokládat, že tepelná výměna bude probíhat i mezi cívkami a magnetickým obvodem a výsledná teplota bude v případě cívek nižší, v případě magnetického obvodu naopak vyšší, než jsou hodnoty získané výpočtem. Tuto skutečnost nám ale ukáže až reálné měření oteplení transformátoru v laboratoři.

2 Měření na transformátoru

Měření na daném transformátoru bylo provedeno dle normy ČSN EN 61558-1 ed. 2 Bezpečnost výkonových transformátorů, napájecích zdrojů, tlumivek a podobných výrobků Část 1: Všeobecné požadavky a zkoušky, dále Část 2-1: Zvláštní požadavky a zkoušky pro transformátory s odděleným vinutím a pro napájecí zdroje obsahující transformátory s odděleným vinutím pro všeobecné použití a dle normy ČSN 61558-2-6 Zvláštní požadavky a zkoušky pro bezpečnostní ochranné transformátory a pro napájecí zdroje obsahující bezpečnostní ochranné transformátory.

Obsahem těchto norem je zkoušení nejen elektrické, ale i tepelné a mechanické bezpečnosti transformátorů. Dále budou popsány jednotlivé zkoušky, které byly na transformátoru provedeny. Jelikož se tato práce zabývá elektromagnetickým a tepelným výpočtem, byly provedeny pouze elektrické a tepelné zkoušky. Mechanické zkoušky, které tyto normy obsahují, jako je konstrukční provedení, mechanická pevnost nebo odolnost proti korozi na tomto transformátoru provedeny nebyly.

2.1 Popis jednotlivých měření provedených na transformátoru

V této části práce budou stručně popsány měření a zkoušky, které byly na daném transformátoru provedeny.

2.1.1 Měření výstupních veličin při jmenovitém zatížení

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 61558-1 ed. 2 v kapitolách 11 a 12.

V tomto měření se transformátor zapojí naprázdno a odměří se výstupní napětí naprázdno. Poté se transformátor zatíží jmenovitou impedancí a změří se napětí na zátěži. Cílem tohoto měření je zjistit odchylku skutečného výstupního napětí od jmenovitého. Tato odchylka je dána normou a přesné hodnoty pro přesné případy jsou k zjištění právě v normě. Pro náš případ, kdy máme transformátor o výkonu 1600 VA, nesmí odchylka skutečného výstupního napětí při jmenovité zátěži a jmenovitého výstupního napětí překročit 5%. To samé platí pro napětí naprázdno. [12]

2.1.2 Otestování ochranného spojení se zemí

Transformátory ochranné třídy I, jejichž přístupné vodivé části se mohou po poruše izolace stát vodivými, musí být trvale spojeny s ochrannou svorkou transformátoru.

Tato skutečnost se zkouší za pomoci zařízení, které se nazývá měřič zemního odporu (Earth resistance meter). Je to přístroj, který má zdroj střídavého napětí, jehož napětí naprázdno nepřekročí 12 V a jehož výstupní proud je roven 1,5 násobku jmenovitého vstupního proudu, nebo 25A záleží jaká z těchto dvou hodnot je vyšší. Test probíhá po dobu 1 minuty pro každou měřenou část. [12]

Tento přístroj měří úbytek napětí mezi ochrannou svorkou a měřenou vodivou částí a z tohoto úbytku napětí a proudu dopočítá elektrický odpor. [12]

Je striktně dáno, že tato hodnota odporu v žádném případě nesmí přesáhnout hodnotu 0,1 Ω . [12]

2.1.3 Měření naprázdno

Pokud je na štítku transformátoru uveden údaj t_a , provádí se měření naprázdno při této teplotě okolí a po natepování transformátoru na tuto teplotu. [12]

Norma udává měření proudu naprázdno pro zvolenou jmenovitou hodnotu napětí na vstupu, v našem případě na odbočce 400V.

Výstupní svorky transformátoru jsou rozpojeny a proud $I_2 = 0$. Po připojení jmenovitého napětí na primární svorky teče primární cívkou proud, který je roven proudu naprázdno a je to proud, který vybuzuje magnetické pole v magnetickém obvodu transformátoru. Proud naprázdno se skládá ze dvou složek. První složka je induktivního charakteru a reprezentuje hlavní indukčnost a s tím související i hlavní magnetický tok transformátoru v magnetickém obvodu. Druhá složka je složka reprezentující ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní. Vzhledem k těmto skutečnostem můžeme z těchto dvou složek dopočítat dva příčné parametry náhradního schématu, L_μ resp. X_μ respektující hlavní magnetickou reaktanci a odpor R_{Fe} , jakožto fiktivní odpor, na kterém vznikají ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy.

K tomu, abychom ale tyto parametry dopočítali, je potřeba zjistit účinník naprázdno $\cos\varphi_0$. Tento účinník se dopočítává z hodnot činného výkonu a zdánlivého výkonu transformátoru. V našem případě jsme však museli přistoupit k měření jalového výkonu, a následného numerického dopočítání toho činného, jelikož nemáme vyveden střed vinutí a neměli jsme vytvořenou umělou nulu. Měření jalového výkonu se provádí pomocí 3 wattmetrů, každý na jedné fázi, kde proudová svorka je připojena na danou fázi a napěťové svorky jsou zapojeny mezi zbylé dvě fáze, na kterou není zapojena svorka proudová. [13]

2.1.4 Měření nakrátko

Měření nakrátko se podobně jako měření naprázdno provádí při teplotě t_a uvedené na štítku transformátoru a na jmenovité vstupní odbočce 400V.

Vinutí sekundární strany se zkratuje a na primární stranu přivádíme napětí, které postupně zvyšujeme, dokud nám primární cívkou neteče jmenovitý proud I_{1n} . Napětí na vstupu, při kterém teče primární cívkou jmenovitý proud I_{1n} se nazývá napětí nakrátko U_k . Hodnota napětí nakrátko, přepočtena na poměrnou procentní hodnotu nám o transformátoru vypovídá, jak je transformátor měkkým, případně tvrdým zdrojem napětí. Z měření nakrátko také zjistíme ztráty nakrátko, které odpovídají Joulovým ztrátám ve vinutí. Z naměřených hodnot poté můžeme určit podélné parametry náhradního schématu transformátoru. [13]

2.1.5 Oteplovací zkouška

Postup a vyhovující kritéria oteplovací zkoušky jsou detailněji popsány v normě ČSN EN 61558-1 ed. 2 kapitola 14.

Cílem zkoušky je zjistit, zda teplota transformátoru a teplota podložky nepřesahuje normou dané maximální teploty. Tato zkouška se provádí v prostředí bez proudícího vzduchu, aby nebylo možné výsledky zkoušky jakkoliv ovlivnit. Teplota okolního vzduchu musí být při uvedení teploty t_a na štítku transformátoru $t_a \pm 5^\circ\text{C}$. [12]

Postup při provádění této zkoušky je následující. Transformátor je napájen jmenovitým vstupním napětím a je zatížen impedancí, která odpovídá jmenovitému výkonu transformátoru při jeho jmenovitém výstupním napětí. Po odeznění přechodového

děje se změní hodnota výstupního proudu. Poté se na primární straně zvýší napětí na 1,1 násobek jmenovitého napětí a pomocí zátěže se výstupní proud nastaví na hodnotu, jaká zde byla před tím. Když je vše zde popsáno hotové, transformátor se nechá běžet a probíhá oteplovací zkouška. Oteplovací zkouška probíhá v řádu hodin a celková délka je závislá na velikosti transformátoru. Zkouška se považuje za dokončenou, až teplota dosáhne ustálené hodnoty, tj. posledních 5 minut měření hodnota teploty nekolísá o více jak 5 °C. [12]

Hodnoty teplot jsou měřeny na povrchu transformátoru v různých bodech pomocí termočlánků a umisťují se tak, aby jejich vliv na zkoušenou část byl co možná nejmenší. Teplota okolního vzduchu je měřena v dostačující vzdálenosti od transformátoru, aby teplo odcházející z transformátoru tuto hodnotu nezkreslovalo.

Teplota vinutí se určuje za pomoci metody změny odporu. Na začátku zkoušky je teplota vinutí rovna teplotě okolí t_a . Po odpojení transformátoru od napětí se ihned začnou zaznamenávat hodnoty odporů v závislosti na čase, aby bylo možné dopočítáním určit hodnotu odporu v okamžiku odpojení transformátoru. Nárůst teploty ve vinutí se poté dopočte vztahem: [12]

$$\Delta t = \frac{R_{t2} - R_{t1}}{R_{t1}} (x + t_1) - (t_2 - t_1)$$

kde

$x = 234,5$ pro měď

Δt oteplení vinutí

R_{t1} odpor na začátku zkoušky, při teplotě $t_1 = t_a$

R_{t2} odpor na konci zkoušky, po dosažení ustáleného stavu

t_1 teplota okolí na začátku zkoušky

t_2 teplota okolí na konci zkoušky

Následující čtyři zkoušky se provádí na transformátoru bezprostředně po ukončení oteplovací zkoušky, aby se transformátor otestoval v nejvíce nepříznivém stavu. Jsou jimi zkoušky na elektrickou pevnost, která zahrnuje měření izolačního odporu a zkoušku vysokým napětím, zkouška na přetížení transformátoru a zkratová zkouška.

2.1.6 Zkouška elektrické pevnosti

Zkouška elektrické pevnosti se skládá z měření izolačního odporu a zkouškou vysokým napětím.

2.1.6.1 Izolační odpor

Hodnoty izolačních odporů mezi jednotlivými částmi transformátoru nesmí být menší, než jsou předepsané hodnoty v ČSN EN 61558-1 ed.2 kapitola 18.2, tabulka 7.

Měření se provádí přiloženým stejnosměrným napětím, které je zhruba 500 V, přičemž vlastní měření se provede 1 minutu po přiložení napětí.[12]

Pro námi navržený transformátor jsou tyto hodnoty minimálního izolačního odporu následující:

Mezi nebezpečnými živými částmi a kostrou nesmí být hodnota izolačního odporu pro základní izolaci menší než 2 M Ω , dále mezi vstupními a výstupními obvody a mezi vstupními obvody navzájem a výstupními obvody navzájem nesmí být též menší než 2 M Ω . [12]

2.1.6.2 Zkouška elektrické pevnosti vysokým napětím

Hodnoty zkušebních napětí pro zkoušku elektrické pevnosti jsou předepsány v ČSN EN 61558-1 ed.2 kapitola 18.3, tabulka 8a.

Během této zkoušky se předepsané části transformátoru podrobí zkoušce vysokým napětím dle už zmíněné tabulky, kde jsou hodnoty zkušebních napětí předepsané dle napěťových hladin transformátoru. Důležité je, aby zkušební napětí nepřetěžovalo jinou izolaci, jinak se poté musí každá izolace zkoušet odděleně. [12]

Během této zkoušky nesmí nikde nastat přeskok nebo průraz izolace. Výjimku tvoří pouze koróna nebo jiný podobný jev. [12]

Pro námi navržený transformátor jsou hodnoty zkušebního napětí ještě zvětšeny o 25% oproti hodnotám tabulkovým v již zmíněné části normy. Je to způsobeno odlišnou konstrukcí transformátoru, kdy je transformátor zalitý impregnačním lakem a má tak ještě lepší izolační vlastnosti. Proto jsou hodnoty zkušebních napětí následující:

Mezi vstupním a výstupním obvodem 6,1kV AC

Mezi vstupním obvodem a PE 3,1kV AC

Mezi výstupním obvodem a PE 0,5kV AC

2.1.7 Ochrana před přetížením a zkratem

Transformátor jako takový se nesmí stát nebezpečný, nastane-li zkrat nebo přetížení v době normálního použití. [12]

2.1.7.1 Zkouška nadproudovým přetížením

Zkouška nadproudovým přetížením se též provádí ihned po dokončení oteplovací zkoušky. Jistič se nahradí spojem zanedbatelné impedance a pomocí zátěže na sekundární straně se primární proud nastaví na 1,45 násobek jmenovité hodnoty. Tato hodnota se musí udržovat po dobu jedné hodiny a simuluje se tím nadproudová spoušť jističe, který má předepsanou hodnotu vypnutí nadproudu na jednu hodinu. [12]

Cílem této zkoušky je zjistit, zda transformátor vydrží toto přetížení po dobu jedné hodiny bez jakýchkoliv poškození, než by vybavila nadproudová spoušť jističe. Transformátor se po dobu testu sleduje jak vizuálně, tak i teplotně, kde je dáno, že pro izolační třídu B nesmí hodnota teploty vinutí přesáhnout hodnotu 225 °C. Hodnoty maximálních teplot pro ostatní izolační třídy jsou uvedeny v ČSN EN 61558-1 ed. 2, kapitola 15, tabulka 3. [12]

2.1.7.2 Zkouška ochrany proti zkratu

Zkouška ochrany proti zkratu se provádí tak, že se před transformátor zapojí jistič, který byl navržen pro jištění tohoto transformátoru, a při jmenovitém napájení se vyzkratují sekundární svorky. Cílem této zkoušky je kontrola, zda jistič zareaguje dostatečně rychle a nedojde k poškození transformátoru. [12]

Zkouška vybavení jističe při zkratu je důležitá, jelikož námi navržený transformátor spadá dle normy ČSN EN 61558-1 ed. 2 mezi transformátory neodolné vůči zkratu a je proto velmi důležité, aby jistič vybavil co možná nejdříve. Kdyby se tak nestalo, transformátor by se okamžitě poškodil a mohl by se stát velmi nebezpečným i pro své okolí. [12]

2.2 Protokol o měření na transformátoru

2.2.1 Použité měřicí přístroje

Tab. 2 – Použité měřicí přístroje

Měřicí přístroje:		
Datalogger	Fluke Hydra 2638A	LK0105
Digitální multimetr	Fluke 87 V	LK0085
Digitální multimetr	Fluke 87 V	LK0086
Osciloskop	Agilent DSOX 3024A	LK0097
Miliohmometr	Resistomat 2316	LK0060
IR kamera	Fluke Ti 25	LK0082
Posuvné měřidlo	Holex	LK0073
<i>Earthresistance meter</i>	MPO - 01A	LK0077
<i>Dielectricstrength meter</i>	Kikusui	LK0020
Testovací příslušenství		
Odporová zátěž	Frizlen	LK0027 / 29
Regulační transformátor	Rexroth	LK0041
Klimatická skříň	Binder ED400	LK0042

2.2.2 Měření výstupních veličin

Tab. 3 – Hodnoty výstupních veličin

Primární napětí [VAC]	Primární proud naprázdno [AAC]	Primární proud při jmenovitém zatížení [AAC]	Jmenovité sekundární napětí [V]	Naměřené sekundární napětí naprázdno [V]	Naměřené sekundární napětí při zatížení [V]	Rozdíl naměřeného napětí při zátěži a napětím naprázdno [%]	Rozdíl naměřeného napětí při zátěži a jmenovitým napětím [%]	Výsledek (vyhovuje/nevyhovuje)
400	0,1	2,5	31,2	33,7	32,5	3,7	4,2	Vyhovuje

2.2.3 Měření ochranného spojení se zemí

Jelikož je 1,5 násobek jmenovitého vstupního proudu menší, než 25A, volíme pro testování výstupní proud 25A. Na Obr. 2.1 je fotka z měření kde je vidět, jak vypadá přístroj na měření zemnicího odporu.

Tab. 4 – Hodnota zemnicího odporu

Testovací bod	Testovací proud	Zemnicí odpor po 60 sekundách	Výsledek (vyhovuje/nevyhovuje)
Stojná patka	25A	0,015	Vyhovuje



Obr. 2.1 Měření zemnicího odporu

2.2.4 Měření naprázdno a nakrátko

Na transformátoru při teplotě $t_a = 40 \text{ °C}$ proběhlo měření naprázdno a nakrátko. Tato měření byla provedena pouze pro jmenovité hodnoty za účelem dopočítání parametrů náhradního schématu z naměřených reálných hodnot. Dopocítané hodnoty parametrů náhradního schématu a ostatní hodnoty budou dále porovnávány s hodnotami teoreticky vypočtenými.

2.2.4.1 Měření nakrátko a dopočet podélných parametrů náhradního schématu

Tab. 5 – Naměřené hodnoty při měření nakrátko

Nakrátko	U_{1kUV} [V]	U_{1kVW} [V]	U_{1kWU} [V]	I_{1NU} [A]	I_{1NV} [A]	I_{1NW} [A]
	16,69	15,85	16,31	2,46	2,57	2,49

Dále byly ohmovou metodou změřeny hodnoty odporů R_1 a R_2 . Zde je potřeba si uvědomit, že pokud měříme odpor mezi dvěma svorkami vinutí, měříme odpor dvou cívek v sérii, protože máme vinutí zapojeno do hvězdy, a to jak na primární straně, tak na sekundární. Výsledné hodnoty odporů se tedy musí vydělit dvěma, abychom dostali skutečný odpor jedné cívky. V Tab. 6 jsou uvedeny hodnoty změřených odporů, tzn. dvojnásobky skutečných odporů jednotlivých cívek.

Tab. 6 – Hodnoty naměřených odporů

R_{Pri} [Ω]	R_{Sek} [Ω]
3,582	0,0226

Výpočet parametrů podélné větve náhradního schématu

Dopočet napětí nakrátko na jednu fázi:

$$U_{1k} = \frac{\left(\frac{U_{1kUV}}{\sqrt{3}}\right) + \left(\frac{U_{1kVW}}{\sqrt{3}}\right) + \left(\frac{U_{1kWU}}{\sqrt{3}}\right)}{3} = \frac{\left(\frac{16,69}{\sqrt{3}}\right) + \left(\frac{15,85}{\sqrt{3}}\right) + \left(\frac{16,31}{\sqrt{3}}\right)}{3} = 9,4 \text{ V}$$

Primární proud jedné fáze:

$$I_1 = \frac{I_{1NU} + I_{1NV} + I_{1NW}}{3} = \frac{2,46 + 2,57 + 2,49}{3} = 2,5 \text{ A}$$

Impedance nakrátko je:

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_1} = \frac{9,41}{2,5} = 3,77 \Omega$$

Odpory primární a sekundární cívky jsou:

$$R_1 = \frac{R_{Pri}}{2} = \frac{3,582}{2} = 1,79 \Omega$$

$$R_2 = \frac{R_{Sek}}{2} = \frac{0,0226}{2} = 0,011 \Omega$$

$$R'_2 = k^2 R_2 = \left(\frac{400}{32,1}\right)^2 \cdot 0,011 = 1,79 \Omega$$

Výpočet činného odporu nakrátko:

$$R_k = R_1 + R'_2 = 1,79 + 1,79 = 3,58 \Omega$$

Výpočet celkové rozptylové reaktance:

$$X_\sigma = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{3,77^2 - 3,58^2} = 1,18 \Omega$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_\sigma}{2} = 0,59 \Omega$$

Procentní napětí nakrátko:

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1n}} \cdot 100 = \frac{9,41}{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)} \cdot 100 = 4,07 \%$$

2.2.4.2 Měření naprázdno a dopočet příčných parametrů náhradního schématu

Tab. 7 – Naměřené hodnoty při měření naprázdno

Naprázdko	U_{1UV} [V]	U_{1VW} [V]	U_{1WU} [V]	I_{10U} [A]	I_{10V} [A]	I_{10W} [A]	Q_U [VAr]	Q_V [VAr]	Q_W [VAr]
	400,7	400,21	403,1	0,119	0,083	0,124	25,1	16,9	24,8

Výpočet parametrů příčné větve náhradního schématu

Primární napětí jedné fáze:

$$U_{10} = \frac{\left(\frac{U_{1UV}}{\sqrt{3}}\right) + \left(\frac{U_{1VW}}{\sqrt{3}}\right) + \left(\frac{U_{1WU}}{\sqrt{3}}\right)}{3} = \frac{\left(\frac{400,7}{\sqrt{3}}\right) + \left(\frac{400,21}{\sqrt{3}}\right) + \left(\frac{403,1}{\sqrt{3}}\right)}{3} = 231,69 \text{ V}$$

Proud naprázdno jedné fáze:

$$I_{10} = \frac{I_{10U} + I_{10V} + I_{10W}}{3} = \frac{0,119 + 0,083 + 0,124}{3} = 0,108 \text{ A}$$

Výpočet impedance naprázdno:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \frac{231,69}{0,108} = 2145,3 \Omega$$

Naměřený jalový výkon transformátoru:

$$Q_1 = Q_U + Q_V + Q_W = 25,1 + 16,9 + 24,8 = 66,8 \text{ VAr}$$

Výpočet zdánlivého výkonu:

$$S_1 = 3U_1I_{10} = 3 \cdot 231,69 \cdot 0,108 = 75,1 \text{ VA}$$

Dopočet činného výkonu:

$$P_1 = \sqrt{S_1^2 - Q_1^2} = \sqrt{75,1^2 - 66,8^2} = 34,3 \text{ W}$$

Účinitík naprázdno:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{34,3}{75,1} = 0,457$$

Výpočet příčných parametrů R_{Fe} a X_μ :

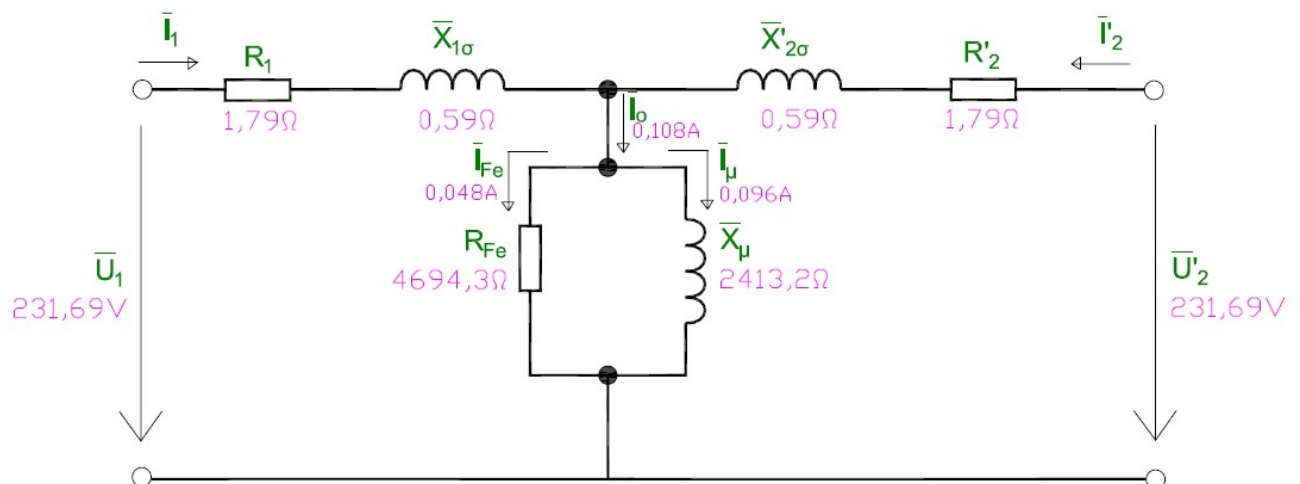
$$R_{Fe} = \frac{Z_0}{\cos \varphi_0} = \frac{2145,3}{0,457} = 4694,3 \Omega$$

$$X_\mu = \frac{Z_0}{\sin \varphi_0} = \frac{2145,3}{0,889} = 2413,2 \Omega$$

Výpočet procentního proudu naprázdno:

$$i_o = \frac{I_{10}}{I_{1n}} \cdot 100 = \frac{0,1}{2,5} \cdot 100 = 4 \%$$

Hodnoty parametrů náhradního schématu získané měřením a dopočtením



Obr. 2.2 Hodnoty náhradního schématu vypočtené z naměřených hodnot

2.2.5 Oteplovací zkouška

Oteplovací zkouška se provádí v klimatické skříni, ve které je na začátku testu teplota 40 °C a transformátor je zatížen jmenovitou zátěží a napájen 1,1 násobkem jmenovitého primárního napětí. Na Obr. 2.3 je fotka měřicího pracoviště a klimatické skříně, ve které test probíhá.



Obr. 2.3 Měřicí pracoviště pro typové zkoušky transformátorů

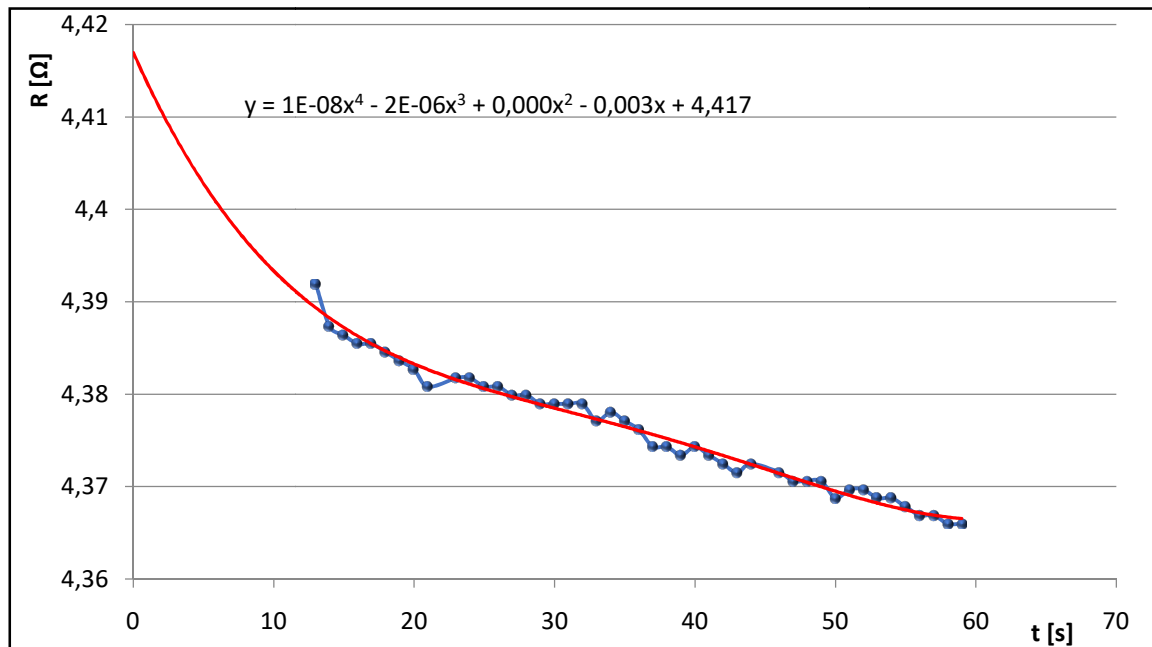
Tab. 8 – Vstupní a výstupní veličiny na měřeném transformátoru

Primární napájecí napětí	440 VAC		
Teplota okolí v okamžiku započetí zkoušky t1	40,0 °C		
Teplota okolí v okamžiku ukončení zkoušky t2	40,6 °C		
Sekundární veličiny (U_2 / I_2)	31,2 VAC / 28,8 AAC		

2.2.5.1 Zjištění oteplení vodičů primární a sekundární cívky

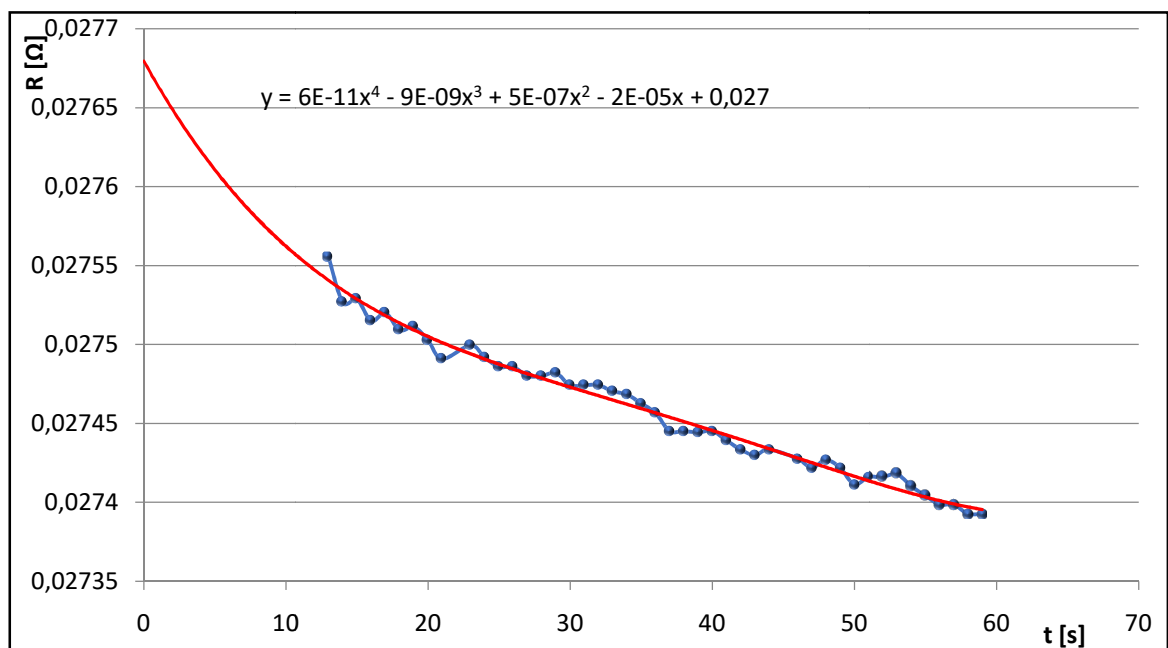
Jak už bylo napsáno v kapitole 2.1.5, hodnota oteplení vodičů cívek se určuje dle vztahu daným normou ČSN EN 68551 ed. 2, kterým lze získat oteplení vodičů pomocí změny odporu. Transformátor se po ukončení zkoušky I_2 odpojí od napájení a zapojí se k přístroji, který po dobu jedné minuty zaznamenává změny odporů primárního a

sekundárního vodiče a zaznamenává tyto hodnoty do grafu, který je zobrazen na Obr. 2.4. Následným proložením těchto hodnot a průsečíku této křivky s osou y lze získat z tohoto grafu hodnotu odporu, který měl daný vodič v okamžiku odpojení od napájení. Po zjištění této hodnoty pak zjistíme oteplení daného vodiče dle zmíněného vztahu v kapitole 2.1.5.



Obr. 2.4 Ochlazovací křivka primárního vinutí (odbočka PRI 400V)

Z grafu na Obr. 2.4 je patrné, že hodnota odporu R_{t2} v čase odpojení od zdroje pro primární vodič byla $R_{t2} = 4,417 \Omega$



Obr. 2.5 Ochlazovací křivka sekundárního vinutí (odbočka SEC 32,1V)

Z grafu na Obr. 2.5 je patrné, že hodnota odporu R_{t2} v čase odpojení od zdroje pro sekundární vodič byla $R_{t2} = 0,0277 \Omega$

Jako hodnoty odporů R_{t1} se berou hodnoty, které byly změřeny při měření na transformátoru při teplotě $40 \text{ }^\circ\text{C}$ v kapitole 2.2.4.1 mezi svorkami. Hodnoty odporů R_{t1} pro primární a sekundární cívku tedy skutečně odpovídají hodnotám R_{Pri} a R_{Sek} uvedené v Tab. 6.

Výpočet oteplení primárního vodiče

$$\Delta t = \frac{R_{t2} - R_{t1}}{R_{t1}} (x + t_1) - (t_2 - t_1) = \frac{4,417 - 3,582}{3,582} \cdot (234,5 + 40) - (40,6 - 40) = 63,4 \text{ K}$$

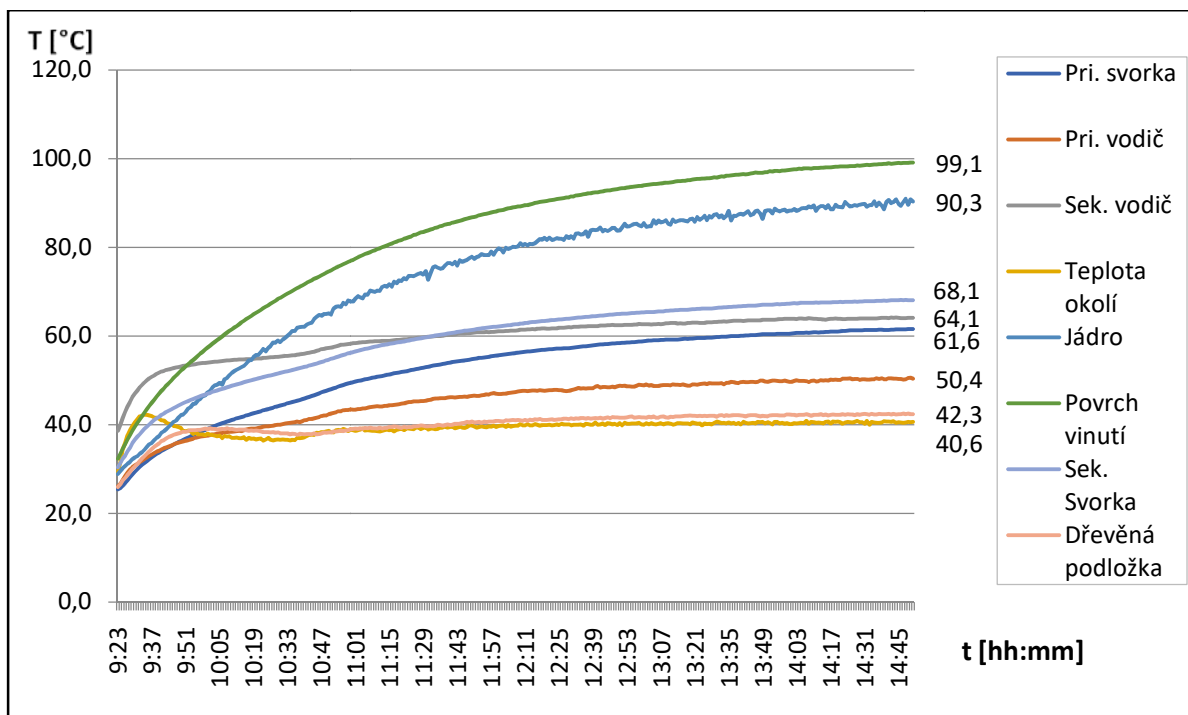
Výpočet oteplení sekundárního vodiče

$$\Delta t = \frac{R_{t2} - R_{t1}}{R_{t1}} (x + t_1) - (t_2 - t_1) = \frac{0,0277 - 0,0226}{0,0226} \cdot (234,5 + 40) - (40,6 - 40) = 61,3 \text{ K}$$

Tab. 9 – Naměřené a spočtené hodnoty při oteplovací zkoušce (oteplení vodičů)

Hodnoty odporů	Odbočka:		Odbočka:	
	PRI:	400 [V]	SEC:	31,2 [V]
Teplota t_1 [$^\circ\text{C}$]	40		40	
Teplota t_2 [$^\circ\text{C}$]	40,6		40,6	
Hodnota odporu R_{t1} [Ω]	3,5820		0,0226	
Hodnota odporu R_{t2} [Ω]	4,4170		0,0277	
Oteplení vodiče Δt [K]	63,4		61,3	

Tímto způsobem tedy máme spočtené oteplení vodičů transformátoru. Ostatní teploty transformátoru se měří pomocí termočlánků připevněných přímo na transformátor po dobu měření. Hodnoty teplot z těchto termočlánků se zaznamenávají v nastavených časových úsecích do počítače. Podle těchto závislostí vynesných do grafu kontrolujeme postupné oteplení jednotlivých částí a poznáme podle průběhů také, kdy dosáhneme ustáleného stavu a můžeme zkoušku ukončit. Tyto závislosti teplot určitých částí transformátoru na čase jsou vyneseny v grafu na Obr. 2.6.

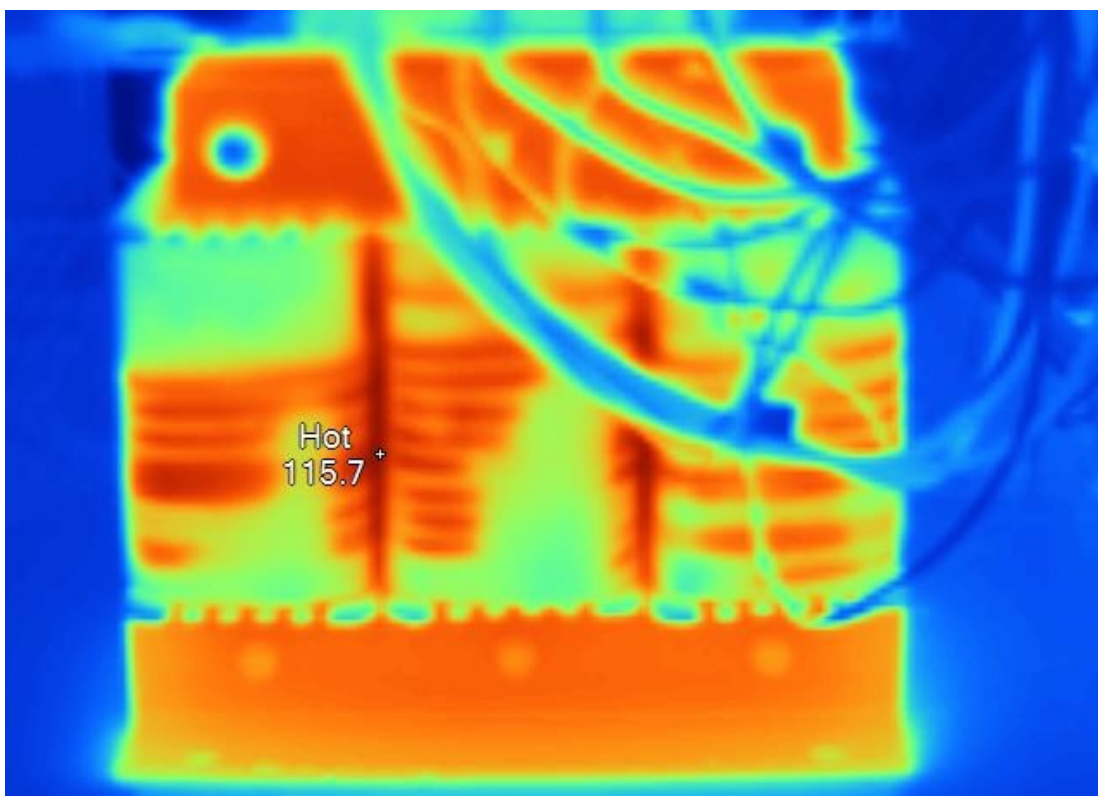


Obr. 2.6 Průběhy teplot na určitých částí transformátoru

Tab. 10 – Hodnoty naměřených teplot na transformátoru

Část transformátoru	Teplota [°C]	Teplota okolí t ₂ [°C]	Teploty přepočítány na teplotu:		Max. teploty dané části dle normy ČSN EN 68551-1	Výsledek (vyhověl/nevychověl)
			40	[°C]		
Vinutí	63,4		103,4		max. 120°C	Vyhověl
Pri. Svorka	61,6	40,6	61,0		max. 70°C	Vyhověl
Pri. Vodič	50,4	40,6	49,8		max. 105°C	Vyhověl
Sek. Svorka	68,1	40,6	67,5		max. 70°C	Vyhověl
Sek. Vodič	64,1	40,6	63,5		max. 105°C	Vyhověl
Dřevěná podložka	42,3	40,6	41,7			N/A
Jádru	90,3	40,6	89,7			N/A
Povrch vinutí	99,1	40,6	98,5			N/A

V Tab. 10 jsou zapsány hodnoty teplot naměřených při oteplovací zkoušce transformátoru. Jak je vidět, transformátor splnil všechny normou dané maximální teploty. Teploty dřevěné podložky, jádra a povrchu vinutí jsou hodnoty pouze informativní, jelikož jejich maximální teplota není dána normou. Pro úplnost všech údajů o provedení oteplovací zkoušky je na Obr. 2.7 přiložen snímek transformátoru pořízen IR kamerou v ustáleném stavu před koncem zkoušky.



Obr. 2.7 Snímek transformátoru pořízen IR kamerou po oteplovací zkoušce

2.2.6 Zkouška elektrické pevnosti

Na transformátoru byla provedena zkouška vysokým napětím. Na transformátor, postupně mezi primární a sekundární cívku, mezi primární cívku a PE svorku a mezi sekundární cívku a PE svorku bylo přiváděno vysoké napětí o hodnotě dané normou. Napětí bylo vždy přiloženo po dobu 1 minuty. Výsledky zkoušky byly vepsány do Tab. 11. Na Obr. 2.8 je ukázka z měření.

Tab. 11 – Výsledek zkoušky vysokým napětím

Zkouška izolace mezi:	Velikost zkušebního napětí:	Došlo k přeskokům či jiné nevyhovující události?	Výsledek (vyhověl/nevyhověl)
Pri - Sec _{AC} [kVAC]	6,1 kVAC	ne	vyhověl
Pri - PE [kVAC]	3,1 kVAC	ne	vyhověl
Sec _{AC} - PE [kVAC]	0,5 kVAC	ne	vyhověl



Obr. 2.8 Měření elektrické pevnosti vysokým napětím

2.2.7 Zkouška ochrany před přetížením a zkratem

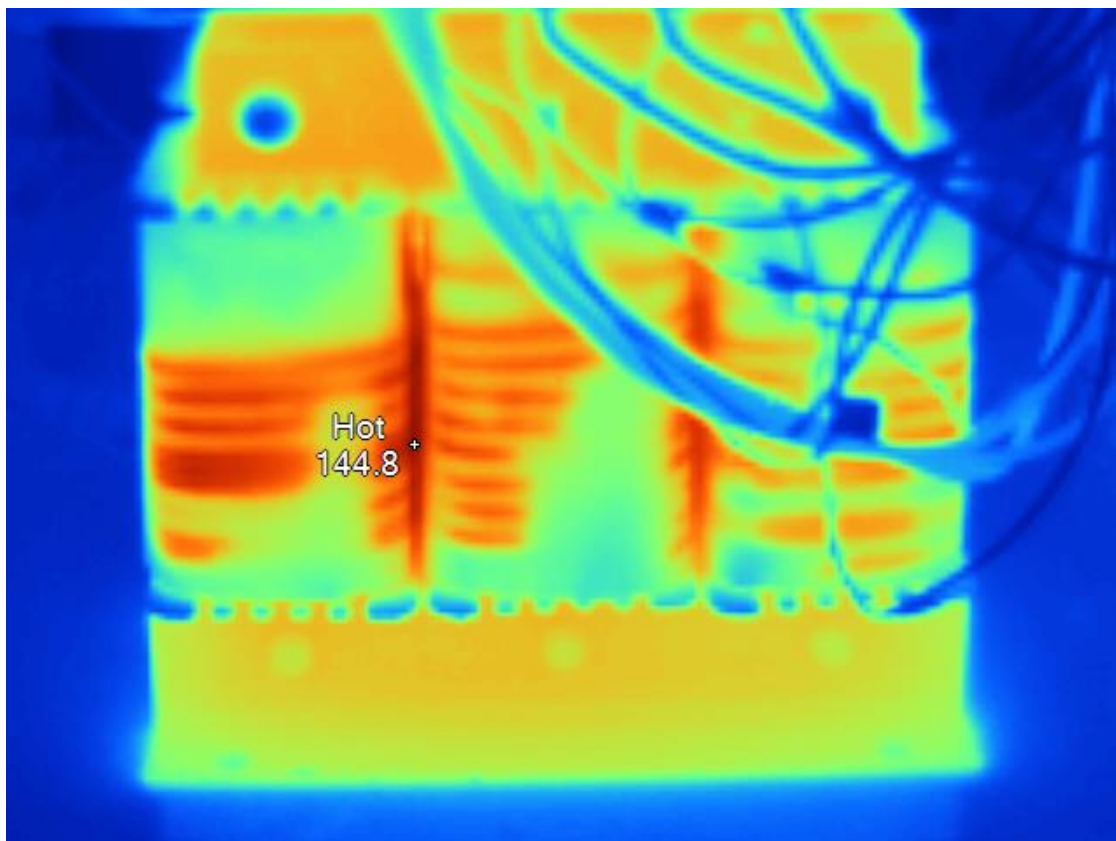
2.2.7.1 Zkouška nadproudovým přetížením

Jak už bylo zmíněno v kapitole 2.1.7, cílem této zkoušky je nasimulovat na transformátoru proudové přetížení po dobu jedné hodiny, kdy by vybavil jistič. Zkouška je jak vizuální, tak se sleduje i teplota transformátoru a hlídá se, aby teplota nepřekročila povolenou mez normou, v našem případě pro izolaci třídy B 225 °C.

Tab. 12 – Vstupní parametry zkoušeného transformátoru na proudové přetížení

Primární napájecí napětí	440 VAC
Primární proud (nadproud, 1,45x I _n)	3,9 AAC
Teplota okolí	40,6 °C
Sekundární veličiny (U ₂ / I ₂)	31,2 VAC / 28,8 AAC

V průběhu zkoušky se transformátor musí vizuálně hlídat z důvodu možné poruchy a v nejhorším případě pálení či doutnání. Pokud se po dobu jedné hodiny nestane nic neočekávané, zaznamenají se teploty na konci zkoušky, pořídí snímek IR kamerou a pokud teplota nepřekročila povolenou mez, zkouška byla úspěšná. Snímek IR kamerou pořízen na konci měření je na Obr. 2.9.



Obr. 2.9 Snímek transformátoru pořízen IR kamerou po zkoušce nadproudovým přetížením

Tab. 13 – Výsledek zkoušky nadproudovým přetížením

Odbočka	Jistící prvek	Nadproud	Zhodnocení	Výsledek (vyhověl/nevyhověl)
PRI 400 VAC	PKZM0-4-T $I_n=2,7A$ (PRI) – Při zkoušce nezapojen!	3,9 AAC	1,45 x I_n ; Teplota nepřekročila povolenou hodnotu danou ČSN EN 68551-1; žádný zápach, žádný kouř ani oheň.	vyhověl

2.2.7.2 Zkouška ochrany proti zkratu

Před transformátor se zařadí jistící prvek a napájí se jmenovitým napětím na odbočce 400V. Poté se cíleně zkratují svorky sekundárního vinutí a pozoruje se, zda jistič vybaví a transformátor zůstane po všech směrech neporušený. Je důležité, aby jistič vybavil co nejrychleji, a na transformátoru nesmí být vidět žádná stopa po sebemenším poškození, průrazu, kouře apod...

Tab. 14 – Výsledek zkoušky ochrany proti zkratu

Odbočka	Jistící prvek	Zhodnocení	Výsledek (vyhověl/nevyhověl)
400V	PKZM0-4-T $I_n=2,7A$ (PRI) PKZM0-32-T $I_n=29A$ (SEK)	Shoření pojistky, transformátor odpojen, bez kouře, zápachu, bez známek poškození	vyhověl

2.2.8 Porovnání vypočtených a skutečných změřených parametrů transformátoru

Tab. 15 – Porovnání parametrů transformátoru (vypočtené/naměřené)

Parametr	Teoreticky vypočtené hodnoty	Hodnoty vypočtené výpočetním programem RALE	Naměřené hodnoty a hodnoty dopočítané z naměřených veličin
Odpor primární cívky R_1 [Ω]	1,860	1,866	1,79
Odpor sekundární cívky R_2 [Ω]	0,012	0,0115	0,011
Rozptylová reaktance primární cívky $X_{\sigma 1}$ [Ω]	0,62	---	0,59
Rozptylová reaktance primární cívky $X_{\sigma 2}$ [Ω]	0,0041	---	0,0038
Fiktivní odpor R_{Fe} [Ω]	4713,06	---	4694,3
Magnetizační reaktance X_{μ} [Ω]	2654,48	---	2713,2
Poměrné napětí nakrátko u_k [%]	3,81	3,93	4,07
Poměrný proud naprázdno i_o [%]	3,83	3,77	4,00
Oteplení cívek $\Delta\theta_c$	74,0	61,3	63,5
Oteplení magnetického obvodu $\Delta\theta_j$	41,6	56,8	49,7

V Tab. 15 jsou zapsány hodnoty parametrů transformátoru. V prvním sloupci jsou hodnoty získané teoretickým výpočtem provedeným v kapitole 1 této práce. Ve druhém sloupci jsou hodnoty, které byly spočteny výpočetním softwarem RALE pro výpočty a návrhy transformátorů. V posledním sloupci jsou hodnoty získané a dopočítané z reálně odměřených hodnot na transformátoru, který byl postaven dle teoretického výpočtu v kapitole 1. Podrobnější porovnání a zhodnocení výsledků je shrnuto v závěru této práce.

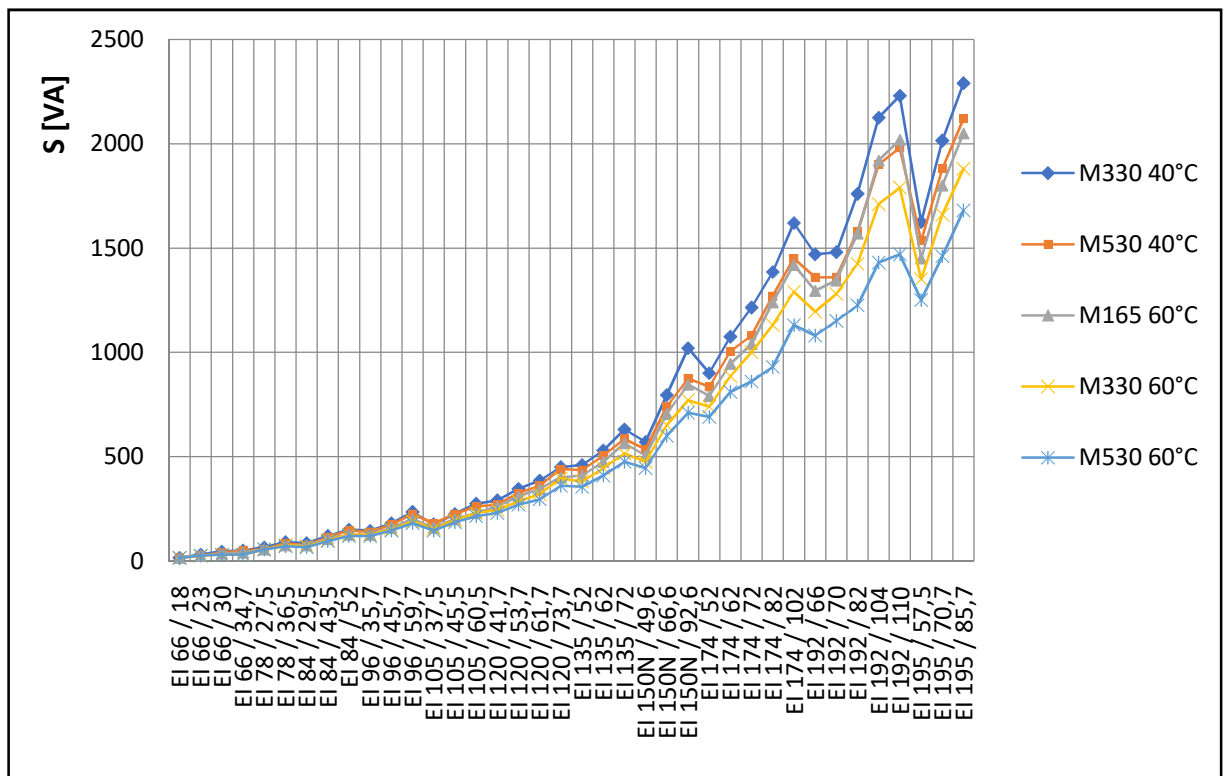
3 Závislost změny rozměrů magnetického obvodu na účinnost transformátoru a oteplení mg. obvodu

V této části práci bude pojednáváno o závislosti změny velikosti magnetického obvodu na účinnosti transformátoru a oteplení jádra. Nebudou zde však závislosti pouze na změně velikosti magnetického obvodu, ale i na kvalitě plechů, ze kterých je magnetický obvod složen. Porovnávaná data v této části práce byla získána téměř dvěma sty výpočty provedenými ve výpočetním programu RALE.

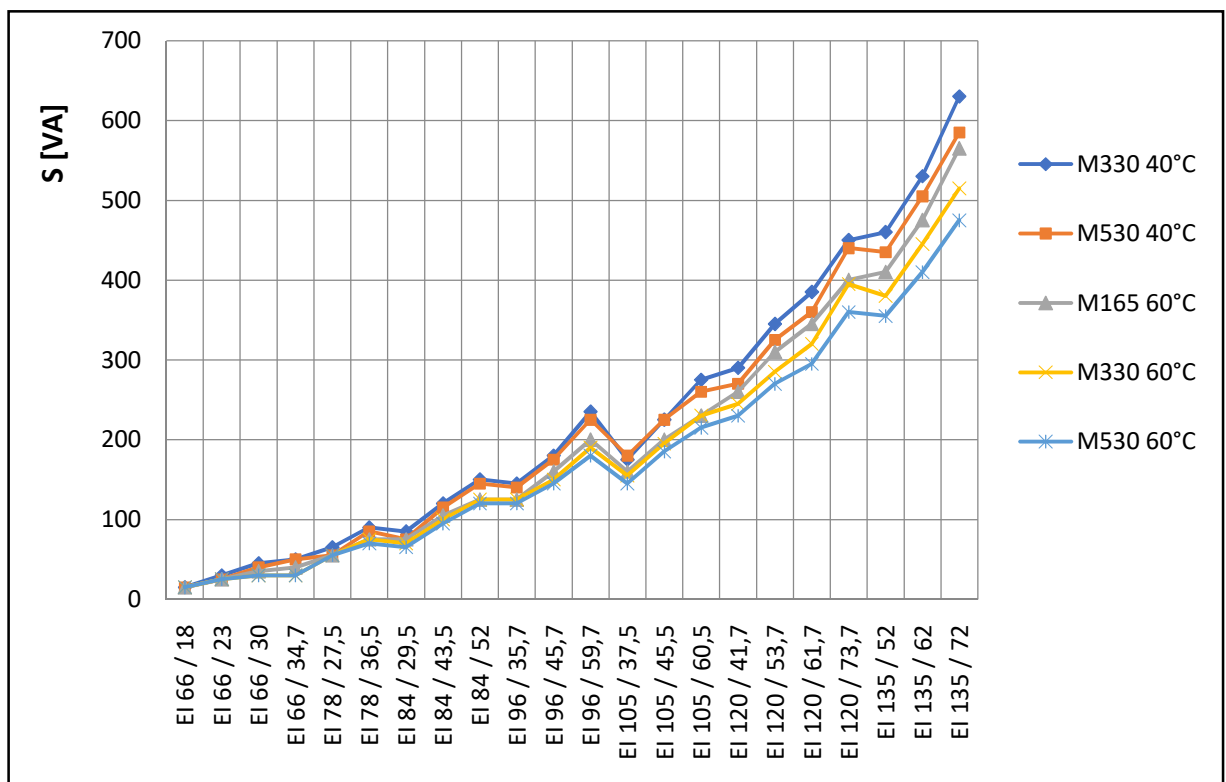
Postupně byly provedeny výpočty pro 38 používaných koster, od nejmenší (EI 66/18) po největší (EI 195/85,7). Základem těchto výpočtů bylo zjistit, jak velký výkon lze reálně na danou kostru nainstalovat, aniž by dovolené oteplení překročilo povolenou hodnotu (v našem případě je horní hranice teploty vinutí 115 °C) a zaplnění kostry cívkou nepřekročilo 90%. Výpočty byly provedeny pro 3 typy plechů, pro plechy M165-50A, M330-50A a M530-50A a pro dvě různé pracovní teploty okolí t_a , a to pro 40°C a 60°C.

3.1 Závislost velikosti magnetického obvodu na maximálním výkonu transformátoru

Na Obr. 3.1 je znázorněna závislost velikostí jednotlivých koster (a tím i velikostí magnetických obvodů) na maximálním možném výkonu, který lze na danou kostru nainstalovat. Na tomto grafu je velmi jasně vidět, jak znatelně kvalita plechu ovlivňuje, jak velký výkon lze na danou kostru nainstalovat. Když se zaměříme například na simulace, které proběhly při teplotě okolí 60 °C, je vidět znatelný rozdíl u koster větších rozměrů, kde rozdíl výkonů na stejné kostře mezi nejhoršími plechy (M530-50A) a nejlepšími (M165-50A) činí i několik stovek VA. Pro lepší rozeznatelnost rozdílů u menších koster je na dalším grafu (Obr. 3.2) znázorněna pouze první polovina koster.



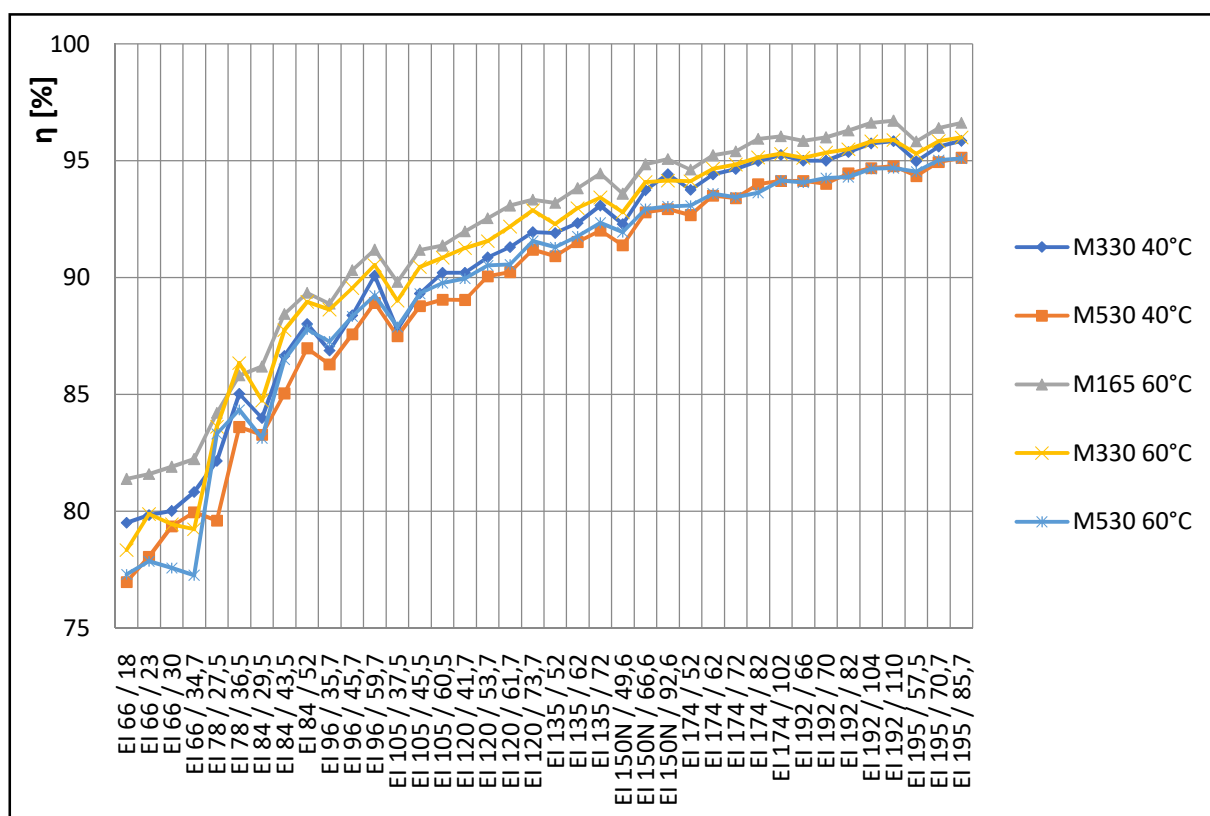
Obr. 3.1 Závislost velikosti kostry a magnetického obvodu na maximálním instalovatelném výkonu



Obr. 3.2 Přiblížení menších rozměrů kostry (část grafu z Obr. 3.1)

3.2 Závislost velikosti magnetického obvodu na účinnosti transformátoru

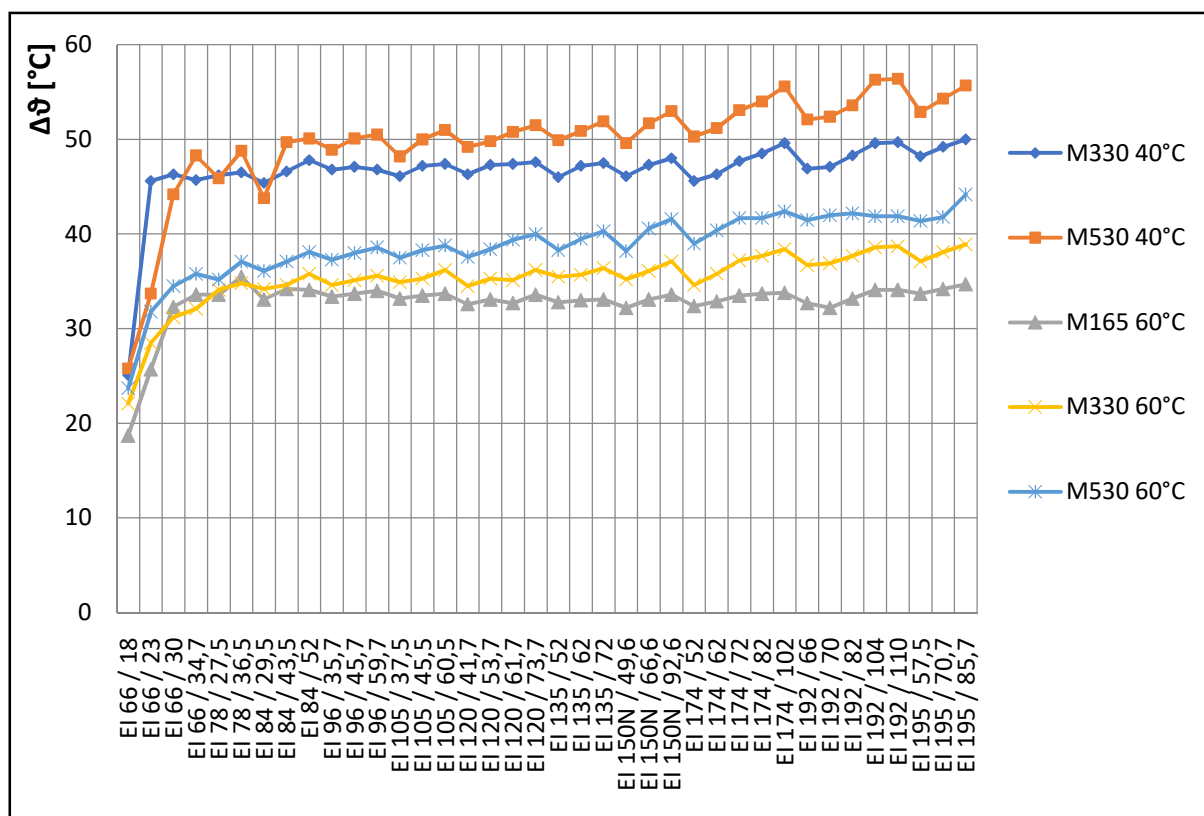
Na Obr. 3.3 je graf popisující, jak velká je účinnost transformátoru, pokud je určitou velikostí magnetického obvodu přenášen jeho maximální výkon. Jak je z grafu patrné, je splněn jeden ze základních předpokladů a to ten, že s rostoucím výkonem a tím i rostoucí velikostí magnetického obvodu roste účinnost transformátoru. Z grafu je však patrná jedna věc, která stojí za povšimnutí. Když se na graf podíváme tak zjistíme, že nezáleží, na jakou teplotu okolí je transformátor navrhován. Ať už pro 40 °C, nebo pro 60°C, vidíme, že záleží pouze na kvalitě použitých plechů. Účinnost jednoho a toho samého použitého plechu pro dvě různé teploty okolí je prakticky stejná, což nám ukazuje i graf. Křivky stejných typů plechů v horní části grafu se prakticky překrývají.



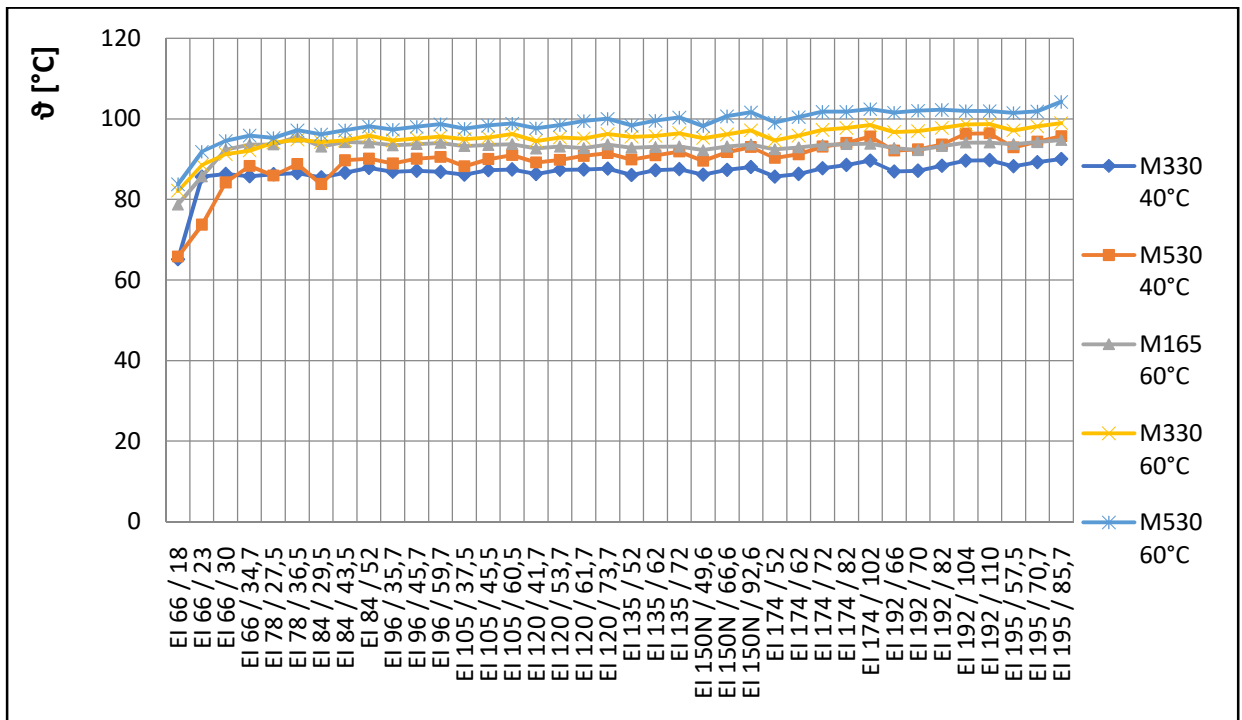
Obr. 3.3 Závislost velikosti mg. Obvodu na účinnosti transformátoru

3.3 Závislost velikosti magnetického obvodu na jeho oteplení

Na Obr. 3.4 jsou vykresleny závislosti velikosti magnetického obvodu na jeho oteplení. Jak je z grafu patrné, změna velikosti magnetického obvodu oteplení prakticky neovlivňuje. Jediná věc, která zásadně ovlivňuje oteplení magnetického obvodu je typ použitých plechů. Je to logické, čím kvalitnější plechy máme, tím menší máme ztráty v železe a o to méně se magnetický obvod zahřeje. Na Obr. 3.5 jsou znázorněny předpokládané teploty magnetických obvodů při maximálním možném výkonu. Zde je patrné, že se hodnoty pohybují zhruba v intervalu od 85 °C do 105 °C. Jak už z logiky věci vyplývá, nejvyšší teplotu magnetického obvodu bude mít transformátor složený z nejméně kvalitních plechů M530 při teplotě okolí 60°C, naopak nejnižší transformátor z plechů M330 při teplotě okolí 40°C.



Obr. 3.4 Závislost velikosti mg. obvodu na jeho oteplení



Obr. 3.5 Teploty magnetických obvodů při maximálním výkonu

Závěr

V předložené diplomové práci byl navržen 3 fázový transformátor o celkovém výkonu 1600 VA. Pro magnetický obvod byly zvoleny plechy M530-50A s rozměrovým označením 3 UI 120 od firmy Waasner. Z důvodu vypočteného požadovaného průřezu jádra vinutí byla zvolena šířka paketu dle nejbližší vyšší možné hodnoty s ohledem na vyráběné rozměry koster cívek. Jako nejideálnější tedy vyšla kostra s označením UI 120/61 od firmy Michael, šířka paketu je tedy 61 mm. Vinutí bylo dle elektrického návrhu navinuto do těchto koster z měděných vodičů o kruhovém průřezu daným výpočtem. Po dopočítání základního elektromagnetického návrhu byly dopočítané parametry náhradního schématu, štítkové hodnoty transformátoru a na závěr výpočtu byly navrženy jistící prvky na základě vypočítané hodnoty zapínacího proudu a předpokládané maximální oteplení transformátoru.

Po dokončení celkového elektromagnetického návrhu byl transformátor dle vypočtených hodnot zkonstruován a byla na něm provedena typová zkouška, zda transformátor odpovídá standardům dle ČSN EN 61558-1 ed.2. Po podrobení všem příslušným testům a měřením byl daný transformátor shledán vyhovujícím ve všech bodech zkoušky a z naměřených hodnot byly dále dopočítány skutečné štítkové hodnoty transformátoru a z oteplovací zkoušky zjištěno skutečné oteplení transformátoru.

K názornému porovnání hodnot vypočtených teoretickým výpočtem a hodnot zjištěných měření byly tyto hodnoty vepsány do Tab. 15. Z těchto hodnot je patrné, že všechny hodnoty se od sebe liší o pouhých pár procent a je vidět, že teoretický výpočet se o moc neliší od skutečných parametrů transformátoru. U některých hodnot se tyto odchylky daly očekávat. Například u hodnot odporů, kde bylo teoreticky počítáno s ideálně obdélníkovými závitů a celková hodnota délky vodiče poté zmenšena o 10%. Z tohoto tedy vyplývá, že hodnota 10% nebyla pro náš případ ideální a vodič je ještě kratší, než jsme očekávali. Dále je z tabulky vidět, že i hodnoty napětí nakrátko a proudu naprázdno vyšly nepatrně vyšší. U proudu naprázdno to bude nejspíše způsobené manuální nedokonalostí při výrobě transformátoru. Transformátor se vyrábí manuálně a plechy jsou poté svařovány. Tyto sváry jsou poté občas hlubší, než je zamýšleno, plechy magnetického obvodu jsou v místě sváru poté zkratovány a občas plechy ani nedosednou pořádně na sebe

a vzniká tak v cestě magnetického toku dodatečný magnetický odpor, který navyšuje potřebnou magnetizaci magnetického obvodu a narůstá tím také nepatrně hodnota proudu naprázdno. Nakonec stojí za povšimnutí také fakt, že se potvrdilo, že velký teplotní gradient mezi vinutím a magnetickým obvodem se projevil při oteplovací zkoušce a z naměřených hodnot teplot je vidět, že kostra neoddělila ideálně teplotně tyto dvě části a vinutí se chladilo do magnetického obvodu. Z naměřených hodnot je vidět, že teplota vinutí nám oproti hodnotám vypočteným klesla zhruba o 10 °C a naopak teplota magnetického obvodu o zhruba 10 °C vzrostla. Potvrdilo se nám tím tedy, že plastová kostra opravdu teplotně tyto části neoddělí a náš předpoklad při teoretickém výpočtu nebyl naplněn.

V poslední části práce bylo použito téměř 200 výpočtů z výpočtového programu RALE pro návrh transformátorů a byly vyneseny závislosti maximálních výkonů podle velikosti kostry, účinnosti a oteplení magnetického obvodu. Použité byly 3 typy plechů při dvou různých teplotách okolí. Ze závislostí byly potvrzeny teoretické předpoklady vzrůstající účinnosti při zvyšování výkonu a zvětšování magnetického obvodu a snížení oteplení při použití lepší kvality plechů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

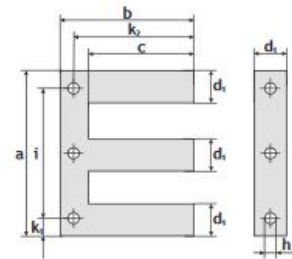
- [1] DESHPANDE, M. V. *Design and testing of electrical machines*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2010. 495 s. ISBN 978-81-203-3645-2
- [2] DEL VECCHIO, Robert M., et al. *Transformer design principles: with applications to core-form power transformers*. CRC press, 2010. 599 s. ISBN 90-5699-703-3
- [3] FLANAGAN, William M. *Handbook of transformer design and applications*. New York: McGraw-Hill, 1993. ISBN 0-07-021291-0
- [4] MCGRAW HILL, COMPANIES TRANSFORMERS. TATA MCGRAW-HILL, 2003, 1987 BY BHARAT HEAVY ELECTRICAL LIMITED, PIPLANI, BHOPAL, MP. ISBN 0-07-144785-7
- [5] PALACKÉHO UNIVERZITA V OLOMOUCI, Katedra technické a informační výroby. *Postup návrhu transformátoru* [online], cit. 14.05.17, Dostupné z: <http://www.kteiv.upol.cz/uploads/soubory/serafin/vseel/postup-navrhu-transformatoru.docx>
- [6] JAMALI, M., MIRZAIE, M., GHOLAMAIN ASGHAR, S., *Calculation and Analysis of Transformer inrush Current based on Parameters of Transformer and Operating Condition*, Babol University of Technology, 2011, cit. 14.05.17, Dostupné z: http://www.ee.ktu.lt/journal/2011/03/04__ISSN_1392-1215_Calculation%20and%20Analysis%20of%20Transformer%20Inrush%20Current%20Based%20on%20Parameters%20of%20Transformer%20and%20Operating%20Conditions.pdf
- [7] HRUŠKA, K., *Teorie elektrických strojů 2: Rozptylová indukčnost vinutí*. [online] Cit. 14.05.07 Dostupné z: <http://portal.zcu.cz/Courseware/reportlets2/DownloadDokumentu?id=110783>
- [8] OLINO Renewable energy, *Inrush current* [online], cit. 14.05.17, Dostupé z: <http://www.olino.org/us/articles/2013/10/22/inrush-current-for-led-light-bulbs>
- [9] WAASNER, *Kernblechte Core Laminations* [online], cit. 14.05.17, Dostupé z: http://www.waasner.de/fileadmin/Assets/PDFs/Katalog_Waasner_12_2015.pdf#page=7
- [10] MICHAEL Kunststofftechnik, *Produkte, Spolenkörper, UI* [online], cit. 14.05.17, Dostupé z: <http://www.michael-kunststofftechnik.de/spulenkoerper-fuer-bleche-produkte.php?ftid=163>
- [11] SŠTaS Karviná, *Návrh transformátoru* [online], cit. 14.05.17, Dostupé z: www.intranet.ssinte-karvina.cz/moodle/mod/resource/view.php?id=808&redirect=1
- [12] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA, *ČSN EN 68551-1 ed.2* [online], cit. 14.05.17, Dostupé z: http://import.technickenormy.cz/nahledy/76121_nahled.htm

- [13] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – Technická univerzita Ostrava, *Měření transformátoru naprázdno a nakrátko*[online], cit. 14.05.17, Dostupé z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/se/cast_B_el_stroje/se_es_c1_naprnakr.pdf

Přílohy

Příloha 1 – Katalog velikostí plechů 3UI [9]

3UI - DREHSTROMBLECHE/ 3UI - PHASE LAMINATIONS



Bestell-Nr. Order-No.	*	Typ Type	IEC	a ¹⁾	b	c ¹⁾	d ₁	h ¹⁾	i ¹⁰⁾	k ₁	k ₂
14.490	*	3 UI 30 / EI 50/50	YUI 2 - 10	50,00	40,00	30,00	10,0	3,5	40,00	5,00	35,00
14.495	*	3 UI 39 / EI 65/65	YUI 2 - 13	65,00	52,00	39,00	13,0	3,5	52,00	6,50	45,50
14.500	*	3 UI 48 / EI 80/80	YUI 2 - 16	80,00	64,00	48,00	16,0	4,5	64,00	8,00	56,00
14.505	*	3 UI 60 / EI 100/100	YUI 2 - 20	100,00	80,00	60,00	20,0	4,5	80,00	10,00	70,00
14.510		3 UI 75 / EI 125/125	YUI 2 - 25	125,00	100,00	75,00	25,0	5,5	100,00	12,50	87,50
14.515		3 UI 90 / EI 150/150	YUI 2 - 30	150,00	120,00	90,00	30,0	8,5	120,00	15,00	105,00
14.550		3 UI 102 / EI 170/170	YUI 2 - 34	170,00	136,00	102,00	34,0	8,5	136,00	17,00	119,00
14.520		3 UI 105 / EI 175/175		175,00	140,00	105,00	35,0	8,5	140,00	17,50	122,50
14.555		3 UI 114 / EI 190/190	YUI 2 - 38	190,00	152,00	114,00	38,0	11,0	152,00	19,00	133,00
14.525		3 UI 120 / EI 200/200		200,00	160,00	120,00	40,0	11,0	160,00	20,00	140,00
14.560		3 UI 132 / EI 220/220	YUI 2 - 44	220,00	176,00	132,00	44,0	11,0	176,00	22,00	154,00
14.530		3 UI 150 / EI 250/250	YUI 2 - 50	250,00	200,00	150,00	50,0	11,0	200,00	25,00	175,00
14.535		3 UI 168 / EI 280/280	YUI 2 - 56	280,00	224,00	168,00	56,0	11,0	224,00	28,00	196,00
14.540		3 UI 180 / EI 300/300	YUI 2 - 60	300,00	240,00	180,00	60,0	11,0	240,00	30,00	210,00
14.545		3 UI 210 / EI 350/350	YUI 2 - 70	350,00	280,00	210,00	70,0	15,0	280,00	35,00	245,00
14.546		3 UI 240 / EI 400/400	YUI 2 - 80	400,00	320,00	240,00	80,0	15,0	320,00	40,00	280,00

* = 4 Looh / ** = 4 holes



Příloha 2 – Katalog velikostí koster cívek UI 120 [10]

UI 120 oD		MICHAEL												
<p>Ausführung oD – mit offenen Drahtausführungsschlitzen, Darstellung B, nach DIN 41 305, Zwischenflansch geschlitzt</p> <p>Type oD – with open output slots for wire leads, version B, to DIN 41 305, with slotted intermediate flange</p>														
Type	Ka	Art. Nr.	Wz.	a	b	c	d	f	l	l1	l2	s2	z1	z2
UI 120/41 oD	1	43 068.0	308/3	41,0	41,0	78,6	85,0	22,0	114,5	118,5	127,2	2,0	-	-
UI 120/41 oD	2	43 069.1	308/3	41,0	41,0	78,6	85,0	22,0	114,5	118,5	127,2	2,0	56,1	56,1
UI 120/51 oD	1	43 070.4	308/4	41,0	51,0	78,6	95,0	22,0	114,5	118,5	127,2	2,0	-	-
UI 120/51 oD	2	43 071.1	308/4	41,0	51,0	78,6	95,0	22,0	114,5	118,5	127,2	2,0	56,1	56,1
UI 120/61 oD	1	43 072.2	308/5	41,0	61,0	78,6	105,0	22,0	114,5	118,5	127,2	2,0	-	-
UI 120/61 oD	2	43 073.3	308/5	41,0	61,0	78,6	105,0	22,0	114,5	118,5	127,2	2,0	56,1	56,1
UI 120/66 oD	1	43 074.4	308/7	41,0	66,0	78,6	110,0	22,0	114,5	118,5	126,5	2,0	-	-
UI 120/66 oD Zwischenflansch geschlitzt	2	43 075.5	308/2	41,0	66,0	78,6	110,0	22,0	114,5	118,5	126,5	2,0	56,1	56,1
UI 120/71 oD	1	43 076.6	308/2	41,0	71,0	78,6	115,0	22,0	114,5	118,5	126,5	2,0	-	-
UI 120/71 oD Zwischenflansch geschlitzt	2	43 077.7	308/2	41,0	71,0	78,6	115,0	22,0	114,5	118,5	126,5	2,0	56,1	56,1
UI 120/71 oD Zwischenflansch geschlitzt	2	43 160.3	308/2	41,0	71,0	78,6	115,0	22,0	114,5	118,5	126,5	2,0	66,8	45,4
UI 120/75 oD	1	43 078.8	308/6	41,0	75,0	78,6	119,0	22,0	114,5	118,5	126,5	2,0	-	-
UI 120/75 oD Zwischenflansch geschlitzt	2	43 079.9	308/6	41,0	75,0	78,6	119,0	22,0	114,5	118,5	126,5	2,0	56,1	56,1
<p>Ausführungsänderungen vorbehalten. Toleranzen nach DIN 16 901. Toleranzabweichungen sowie Flanschverzug wegen unterschiedlicher Schwindmaße bei glasfaserverstärkten Kunststoffen möglich. Design specification subject to change without notice. Tolerances according to DIN 16 901. Difference in tolerance as well as distortion to the flange is possible because of glass fibre reinforced plastic material properties.</p>														

Příloha 3 – Katalog průměrů vodičů od výrobce

Cul-Draht Maße nach DIN EN 60317-0-1

Synflex Elektro GmbH Co. KG

Nennmaß mm	Toler. (+/-)	d1		Leiter kg/1000m	d2		Grad1		d2		Lackdraht		Grad2		d2		Lackdraht		Ohm/m		Ohm/m	
		UGW	OGW		UGW	MW	OGW	UGW	MW	OGW	UGW	MW	OGW	UGW	MW	OGW	UGW	MW	UGW	Nennwert	OGW	
0,030				0,0063	0,033	0,0350	0,037	0,0066	0,038	0,0395	0,041	0,0070							21,7600	24,1600	26,6000	
0,032				0,0072	0,035	0,0370	0,039	0,0075	0,040	0,0415	0,043	0,0079							19,1300	21,2500	23,3800	
0,036				0,0091	0,040	0,0420	0,044	0,0096	0,045	0,0470	0,049	0,1000							15,1600	16,7900	18,4200	
0,038				0,0101	0,042	0,0445	0,047	0,0107	0,048	0,0500	0,052	0,1112							13,6105	15,0726	16,5346	
0,040				0,0112	0,044	0,0465	0,049	0,0118	0,050	0,0520	0,054	0,1233							12,2800	13,6000	14,9200	
0,045				0,0142	0,050	0,0525	0,055	0,0149	0,056	0,0585	0,061	0,1556							9,7050	10,7500	11,7900	
0,050				0,0175	0,055	0,0575	0,060	0,0184	0,061	0,0635	0,066	0,1919							7,9220	8,7060	9,4890	
0,053				0,0197	0,058	0,0615	0,064	0,0207	0,065	0,0675	0,070	0,2215							7,0509	7,7482	8,4456	
0,055				0,0220	0,062	0,0645	0,067	0,0230	0,068	0,0710	0,074	0,2399							6,3160	6,9400	7,5650	
0,060				0,0252	0,066	0,0690	0,072	0,0264	0,073	0,0760	0,079	0,2735							5,3620	6,0460	6,5290	
0,063				0,0278	0,069	0,0725	0,076	0,0292	0,077	0,0800	0,083	0,3030							5,0450	5,4840	5,9220	
0,067				0,0315	0,074	0,0770	0,080	0,0330	0,081	0,0845	0,088	0,3342							4,4040	4,8480	5,2960	
0,071	0,003	0,064	0,070	0,0354	0,078	0,0810	0,084	0,0369	0,085	0,0880	0,091	0,3381	0,088	0,0925	0,097	0,0389	0,3910	3,9410	4,3180	4,7490		
0,075	0,003	0,072	0,078	0,0395	0,082	0,0855	0,089	0,0412	0,090	0,0925	0,095	0,0424	0,095	0,0985	0,102	0,0436	3,5470	3,8700	4,2330			
0,080	0,003	0,077	0,083	0,0449	0,087	0,0905	0,094	0,0467	0,095	0,0980	0,101	0,0482	0,100	0,1040	0,108	0,0494	3,1330	3,4010	3,7030			
0,085	0,005	0,082	0,088	0,0507	0,093	0,0965	0,100	0,0528	0,101	0,1040	0,107	0,0543	0,107	0,1105	0,114	0,0558	2,7670	3,0120	3,2650			
0,090	0,003	0,087	0,093	0,0568	0,098	0,1015	0,105	0,0591	0,106	0,1095	0,113	0,0608	0,112	0,1160	0,120	0,0623	2,4950	2,6870	2,9000			
0,095	0,003	0,092	0,098	0,0633	0,103	0,1070	0,111	0,0658	0,112	0,1155	0,119	0,0677	0,118	0,1220	0,126	0,0693	2,2470	2,4110	2,5940			
0,100	0,003	0,097	0,103	0,0701	0,108	0,1125	0,117	0,0728	0,118	0,1215	0,125	0,0750	0,123	0,1275	0,132	0,0765	2,0340	2,1760	2,3330			
0,106	0,003	0,103	0,109	0,0788	0,115	0,1190	0,123	0,0818	0,124	0,1280	0,132	0,0841	0,132	0,1360	0,140	0,0862	1,8160	1,9370	2,0690			
0,112	0,003	0,109	0,115	0,0880	0,121	0,1255	0,130	0,0913	0,131	0,1350	0,139	0,0938	0,138	0,1425	0,147	0,0959	1,6320	1,7350	1,8490			
0,118	0,003	0,115	0,121	0,0977	0,128	0,1320	0,136	0,1012	0,137	0,1410	0,145	0,1037	0,146	0,1500	0,154	0,1064	1,4740	1,5630	1,6500			
0,125	0,003	0,122	0,128	0,1096	0,135	0,1395	0,144	0,1135	0,145	0,1495	0,154	0,1165	0,153	0,1580	0,163	0,1191	1,3170	1,3930	1,4760			
0,132	0,003	0,129	0,135	0,1222	0,143	0,1475	0,152	0,1266	0,153	0,1575	0,162	0,1297	0,162	0,1665	0,171	0,1327	1,1840	1,2490	1,3190			
0,140	0,003	0,137	0,143	0,1375	0,151	0,1555	0,160	0,1421	0,161	0,1660	0,171	0,1456	0,170	0,1755	0,181	0,1489	1,0550	1,1100	1,1700			
0,150	0,003	0,147	0,153	0,1578	0,162	0,1665	0,171	0,1631	0,172	0,1770	0,182	0,1668	0,183	0,1880	0,193	0,1709	0,9219	0,9673	1,0160			
0,160	0,003	0,157	0,163	0,1795	0,172	0,1770	0,182	0,1854	0,183	0,1885	0,194	0,2140	0,206	0,2115	0,217	0,2189	0,7211	0,7531	0,7871			
0,170	0,003	0,167	0,173	0,2027	0,183	0,1885	0,194	0,2095	0,195	0,2000	0,205	0,2344	0,205	0,2110	0,217	0,2396	0,6444	0,6718	0,7007			
0,180	0,003	0,177	0,183	0,2272	0,193	0,1985	0,204	0,2344	0,227	0,2330	0,239	0,2951	0,239	0,2455	0,252	0,3012	0,5237	0,5441	0,5657			
0,190	0,003	0,187	0,193	0,2532	0,204	0,2100	0,216	0,2614	0,241	0,2475	0,254	0,3319	0,255	0,2615	0,268	0,3392	0,4669	0,4843	0,5026			
0,200	0,003	0,197	0,203	0,2805	0,214	0,2200	0,226	0,2891	0,268	0,2755	0,283	0,4113	0,268	0,2755	0,283	0,4113	0,4188	0,4338	0,4495			
0,212	0,003	0,209	0,215	0,3152	0,227	0,2335	0,240	0,3250	0,282	0,2895	0,297	0,4601	0,298	0,3050	0,312	0,4695	0,3345	0,3492	0,3628			
0,224	0,004	0,221	0,227	0,3519	0,239	0,2455	0,252	0,3622	0,335	0,3435	0,352	0,5598	0,330	0,3375	0,345	0,5861	0,2676	0,2776	0,2886			
0,236	0,004	0,246	0,254	0,4384	0,267	0,2740	0,281	0,4512	0,296	0,3060	0,314	0,5164	0,318	0,3225	0,330	0,5270	0,2962	0,3089	0,3223			
0,250	0,004	0,261	0,269	0,4925	0,283	0,2900	0,297	0,5067	0,313	0,3210	0,329	0,5750	0,330	0,3375	0,345	0,5861	0,2676	0,2776	0,2886			
0,265	0,004	0,276	0,284	0,5499	0,298	0,3050	0,312	0,5648	0,335	0,3435	0,352	0,6598	0,330	0,3375	0,345	0,6724	0,2335	0,2418	0,2502			
0,280	0,004	0,296	0,304	0,6312	0,319	0,3265	0,334	0,6482	0,350	0,3585	0,367	0,7258	0,368	0,3760	0,384	0,7390	0,2121	0,2193	0,2270			
0,300	0,004	0,311	0,319	0,6959	0,334	0,3415	0,349	0,7137	0,373	0,3820	0,391	0,8215	0,392	0,4000	0,408	0,8359	0,1878	0,1939	0,2004			
0,315	0,004	0,326	0,334	0,7619	0,355	0,3635	0,372	0,8074	0,393	0,4020	0,411	0,9202	0,412	0,4200	0,428	0,9353	0,1674	0,1727	0,1782			
0,335	0,005	0,341	0,349	0,8399	0,376	0,3845	0,393	0,8544	0,415	0,4245	0,434	0,9467	0,434	0,4435	0,452	0,9605	0,1494	0,1548	0,1604			
0,355	0,005	0,356	0,364	0,9299	0,397	0,4055	0,414	0,9467	0,437	0,4465	0,455	1,0615	0,456	0,4650	0,474	1,0764	0,1316	0,1360	0,1407			
0,375	0,005	0,371	0,379	1,0299	0,418	0,4265	0,435	1,0467	0,459	0,4685	0,477	1,1785	0,478	0,4870	0,496	1,1934	0,1117	0,1205	0,1244			
0,400	0,005	0,396	0,404	1,1399	0,439	0,4475	0,456	1,1616	0,492	0,5005	0,513	1,4713	0,514	0,5235	0,533	1,4933	0,1042	0,1075	0,1109			
0,425	0,005	0,421	0,429	1,2599	0,460	0,4685	0,477	1,2816	0,520	0,5305	0,541	1,6394	0,542	0,5520	0,562	1,6632	0,0937	0,0965	0,0994			
0,450	0,005	0,446	0,454	1,3799	0,481	0,4895	0,498	1,4016	0,549	0,5595	0,566	1,8132	0,567	0,5770	0,587	1,8381	0,0846	0,0871	0,0896			
0,475	0,005	0,471	0,479	1,4999	0,502	0,5105	0,519	1,5216	0,578	0,5885	0,600	2,0369	0,601	0,6120	0,623	2,0657	0,0751	0,0775	0,0800			
0,500	0,005	0,496	0,504	1,6199	0,523	0,5315	0,540	1,6316	0,607	0,6185	0,630	2,2699	0,631	0,6420	0,653	2,3001	0,0674	0,0694	0,0715			
0,530	0,006	0,521	0,529	1,7399	0,544	0,5525	0,561	1,7516	0,650	0,6620	0,674	2,5048	0,675	0,6865	0,698	2,5385	0,0586	0,0605	0,0622			
0,560	0,006	0,546	0,554	1,8599	0,565	0,5735	0,582	1,8716	0,700	0,7120	0,726	2,7497	0,725	0,7365	0,748	2,7824	0,0504	0,0518	0,0532			
0,600	0,006	0,591	0,600	2,0799	0,586	0,5945	0,603	2,0916	0,750	0,7620	0,776	3,0006	0,775	0,7865	0,798	3,0324	0,0421	0,0435	0,0449			
0,630	0,007	0,616	0,625	2,1999	0,607	0,6155	0,624	2,2116	0,800	0,8120	0,828	3,2116	0,825	0,8365	0,848	3,2434	0,0340	0,0354	0,0368			
0,670	0,007	0,641	0,650	2,3199	0,628	0,6365	0,645	2,3316	0,850	0,8620	0,878	3,4216	0,875	0,8865	0,898	3,4534	0,0261	0,0275	0,0289			
0,710	0,008	0,703	0,712	2,4399	0,649	0,6575	0,666	2,4516	0,900	0,9120	0,930	3,6316	0,925	0,9365	0,948	3,6634	0,0180	0,0194	0,0208			
0,750	0,008	0,728	0,737	2,5599	0,670	0,6785	0,687	2,5716	0,950	0,9620	0,980	3,8416	0,975	0,9865	0,998	3,8734	0,0100	0,0114	0,0128			
0,800	0,008	0,753	0,762	2,6799	0,691	0,6995	0,708	2,6916	1,000	1,0120	1,030	4,051										

Příloha 4 – Katalog jističů

ca. ZELKO

(ELFETEX?)

2 ks od každého

3RV Circuit Breakers

UL 489

3RV
up to 70 A

SIRIUS



Selection and ordering data



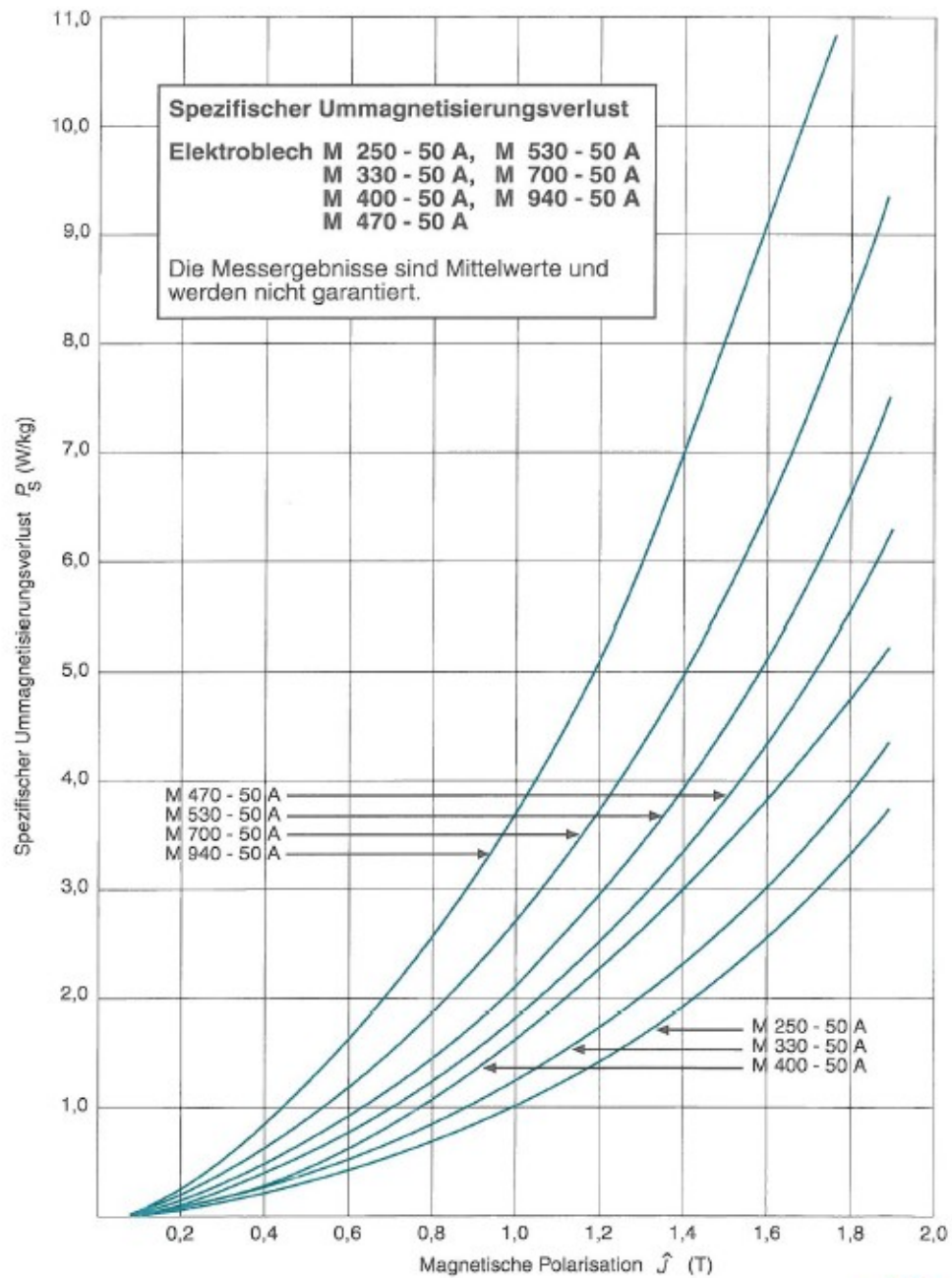
Rated Current ¹⁾ [A]	Thermal overload release (non-adjustable) [A]	Short Circuit breaking capacity [kA]			Instantaneous Over Current Release [A]	For Motor Protection ³⁾		For Transformer Protection ³⁾		
		480 VAC	480Y/277VAC	600Y/347VAC		Order Number (Screw Terminals)	Weight [kg]	Instantaneous Over Current Release [A]	Order Number (Screw Terminals)	Weight [kg]
Innovations Frame Size S00⁴⁾										
0.16	0.16	—	65	10	2.1	3RV2711-0AD10	0.390	3.3	3RV2811-0AD10	0.390
0.2	0.2	—	65	10	2.6	3RV2711-0BD10	0.390	4.2	3RV2811-0BD10	0.390
0.25	0.25	—	65	10	3.3	3RV2711-0CD10	0.390	5.2	3RV2811-0CD10	0.390
0.32	0.32	—	65	10	4.2	3RV2711-0DD10	0.390	6.5	3RV2811-0DD10	0.390
0.4	0.4	—	65	10	5.2	3RV2711-0ED10	0.390	8.2	3RV2811-0ED10	0.390
0.5	0.5	—	65	10	6.5	3RV2711-0FD10	0.390	10	3RV2811-0FD10	0.390
0.63	0.63	—	65	10	8.2	3RV2711-0GD10	0.390	13	3RV2811-0GD10	0.400
0.8	0.8	—	65	10	10	3RV2711-0HD10	0.390	16	3RV2811-0HD10	0.450
1	1	—	65	10	13	3RV2711-0JD10	0.450	21	3RV2811-0JD10	0.450
1.25	1.25	—	65	10	16	3RV2711-0KD10	0.450	26	3RV2811-0KD10	0.460
1.6	1.6	—	65	10	21	3RV2711-1AD10	0.460	33	3RV2811-1AD10	0.460
2	2	—	65	10	26	3RV2711-1BD10	0.460	42	3RV2811-1BD10	0.460
2.5	2.5	—	65	10	33	3RV2711-1CD10	0.460	52	3RV2811-1CD10	0.460
3.2	3.2	—	65	10	42	3RV2711-1DD10	0.460	65	3RV2811-1DD10	0.460
4	4	—	65	10	52	3RV2711-1ED10	0.450	82	3RV2811-1ED10	0.460
5	5	—	65	10	65	3RV2711-1FD10	0.460	104	3RV2811-1FD10	0.460
6.3	6.3	—	65	10	82	3RV2711-1GD10	0.460	130	3RV2811-1GD10	0.460
8	8	—	65	10	104	3RV2711-1HD10	0.460	163	3RV2811-1HD10	0.460
10	10	—	65	10	130	3RV2711-1JD10	0.460	208	3RV2811-1JD10	0.460
12.5	12.5	—	65	10	163	3RV2711-1KD10	0.460	260	3RV2811-1KD10	0.460
15	15	—	65	—	208	3RV2711-4AD10	0.470	286	3RV2811-4AD10	0.470
Innovations Frame Size S0⁴⁾										
20	20	—	50	—	260	3RV2721-4BD10	0.514	325	3RV2821-4BD10	0.516
22	22	—	50	—	286	3RV2721-4CD10	0.516	364	3RV2821-4CD10	0.528
Classic Frame Size S3⁵⁾										
10	10	65	—	20	150	3RV1742-5AD10	0.460	—	—	—
15	15	65	—	20	225	3RV1742-5BD10	0.460	—	—	—
20	20	65	—	20	260	3RV1742-5CD10	0.460	—	—	—
25	25	65	—	20	325	3RV1742-5DD10	0.460	—	—	—
30	30	65	—	20	390	3RV1742-5ED10	0.460	—	—	—
35	35	—	65	20	455	3RV1742-5FD10	0.460	—	—	—
40	40	—	65	20	520	3RV1742-5GD10	0.460	—	—	—
45	45	—	65	20	585	3RV1742-5HD10	0.460	—	—	—
50	50	—	65	20	650	3RV1742-5JD10	0.460	—	—	—
60	60	—	65	20	780	3RV1742-5LD10	0.460	—	—	—
70	70	—	65	10	910	3RV1742-5QD10	0.460	—	—	—

1) 100 % rated value acc. to UL 489 and IEC 60947-2 (100 % rated breaker).
 2) Circuit breakers for system protection of motor and non-motor loads. Requires use of separate overload protection for motor applications.
 3) Circuit breakers for system and transformer protection according to UL/CSA. Specially designed for transformers with high inrush current.
 4) Transverse and lateral auxiliary switches can be ordered separately (see "Mountable accessories").
 5) Transverse auxiliary switches must not be mounted. Lateral auxiliary switches can be ordered separately (see "Mountable accessories").

Refer to page 1/21 when using as upstream protection of a Manual Motor Controller or a Manual Motor Controller Suitable for Tap Conductor Protection in Group Installations.

Příloha 5 – Charakteristika měrných ztrát v železe podle typu plechů [9]

Werkstoff - Kennlinien
für Basismaterial - keine Stanzteile

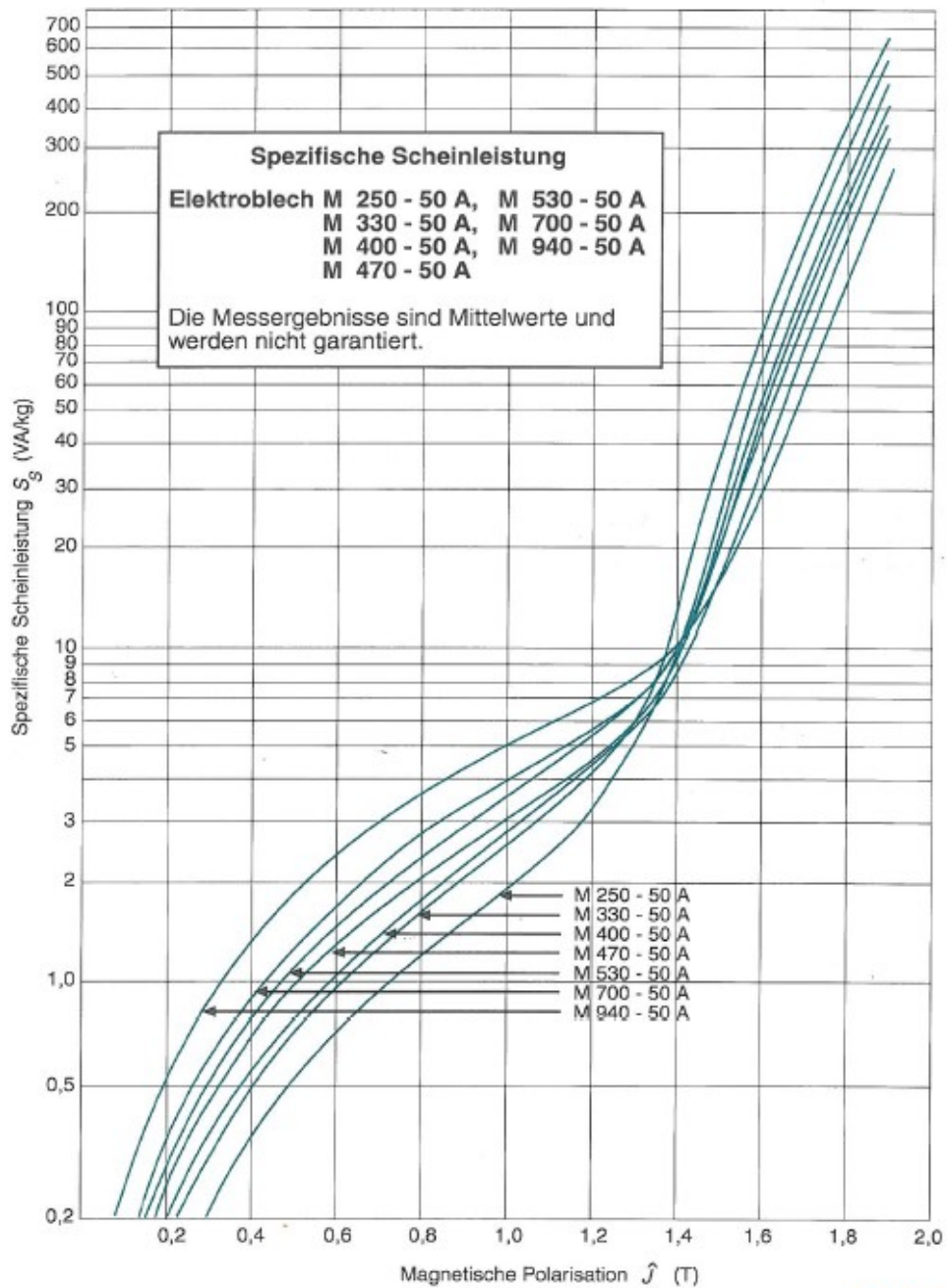


Gebr. Waasner, Elektrotechnische Fabrik GmbH, 91301 Forchheim



Příloha 6 – Charakteristika magnetizace podle typu plechů [9]

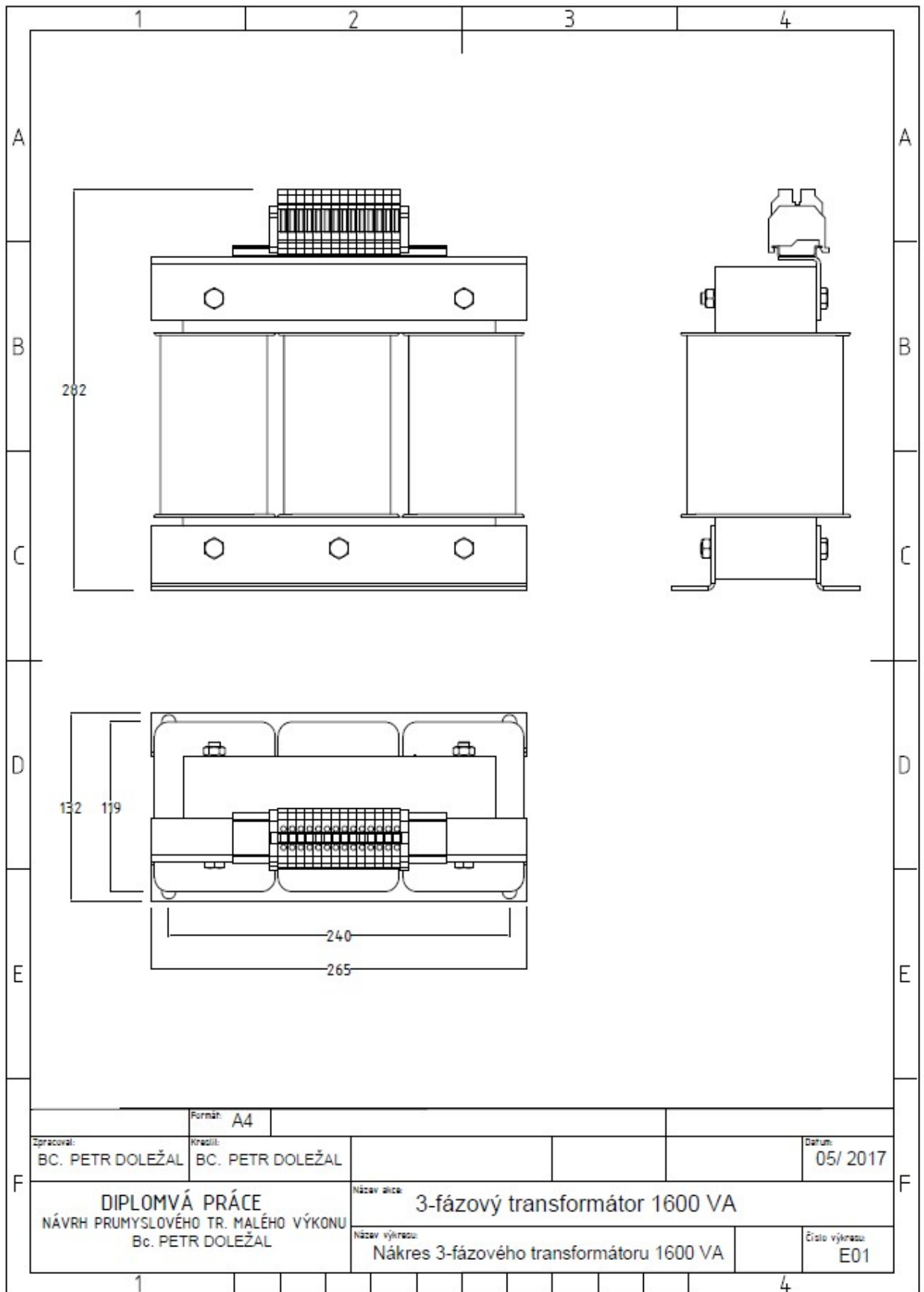
**Werkstoff - Kennlinien
für Basismaterial - keine Stanzteile**



Gebr. Waasner, Elektrotechnische Fabrik GmbH, 91301 Forchheim



Příloha 7 – Výkres transformátoru se základními rozměry



Příloha 8 – Fotky navrženého zkonstruovaného transformátoru

