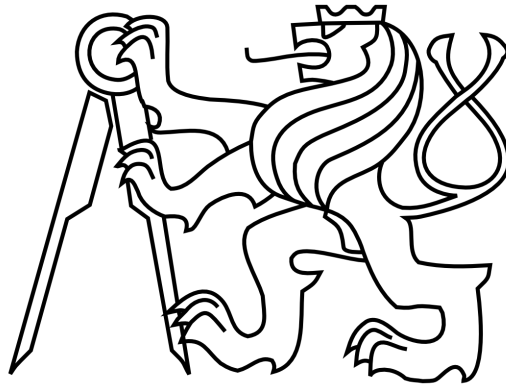


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra elektrických pohonů a trakce**



**Experimentální ověření výpočtu oteplení suchého  
transformátoru**

**Experimental Evaluation of Warming of the Dry  
Transformer**

**Bakalářská práce**

Vypracoval: Jan Pavluk

Vedoucí práce: Ing. Karel Buhr, CSc.

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Jan Pavluk

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: Experimentální ověření výpočtu oteplení suchého transformátoru

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s metodikami výpočtu oteplení a realizace oteplovací zkoušky transformátorů.
2. Proveďte elektromagnetický a tepelný přepočít laboratorního transformátoru 3 kVA
3. Navrhněte pracoviště a realizujte oteplovací zkoušku stroje
4. Analyzujte shromážděná data

Seznam odborné literatury:

- [1] Nosek K., Hapl J., Stavba transformátorů, ČVUT v Praze, 1971
- [2] ČSN EN 60076-2, Výkonové transformátory – Část 2: Oteplení

Vedoucí: Ing. Karel Buhr, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 10. 2014

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Jméno a příjmení

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Karlu Buhrovi, CSc. za odborný dohled, znalosti z praxe a vedení. Dále Katedře elektrických pohonů a trakce, že mi dovolila pro měření použít transformátor z halové laboratoře. A v neposlední řadě své rodině za veškerou podporu.

## **Klíčová slova**

Transformátor, oteplovací zkouška transformátoru, ztráty v transformátoru

## **Key words**

Transformer, warming test of transformer, losses in transformer

## **Abstrakt**

Cílem této práce je seznámení se s metodikami výpočtu oteplení, realizace oteplovací zkoušky suchého laboratorního transformátoru 3kVA a analýza naměřených dat. Vlastní oteplovací zkouška byla realizována v náhradním zapojení nakrátko. Data byla shromažďována pomocí výkonového analyzátoru ve formátu .xls (Microsoft Excel), zpracována do grafické podoby a stochasticky vyhodnocena.

## **Abstract**

The aim of this bachelor thesis is get to know the methodics of warming evaluation, realisation of warming test of dry laboratory transformer 3kVA and analyses of measurement data. The warming test itself was realized in short-circuit connection. The data were collected by power analyser in .xls format (Microsoft Excel), issued into graphical form and stochastically evaluated.

## Obsah:

Úvod .....	1
1 Realizace oteplovací zkoušky a výpočet oteplení (ČSN EN 60076-2; ČSN 35 1002) ...	3
1.1 Teplota chladícího vzduchu .....	3
1.2 Metody provedení oteplovací zkoušky .....	4
1.3 Určení odporu vinutí po odpojení od napájení .....	4
1.4 Určení střední teploty vinutí .....	6
1.5 Určení teploty vinutí před odpojením napájecího zdroje .....	7
1.6 Trvání oteplovacích zkoušek .....	7
2 Metodika výpočtu oteplení .....	8
2.1 Oteplení vinutí transformátoru s plynným dielektrikem .....	8
2.2 Odvod tepla prouděním .....	10
2.2.1 Druhy proudění a mezní vrstva .....	11
2.3 Odvod tepla svislou stěnou .....	12
2.4 Určení součinitele přestupu pro svislou stěnu podle Lorenze .....	13
2.5 Přechodné tepelné vztahy .....	14
2.5.1 Oteplování .....	14
2.5.2 Ochlazování .....	16
3 Velikost odváděných ztrát .....	16
3.1 Ztráty nakrátko .....	16
3.1.1 Ztráty ve vinutí .....	17
3.1.2 Výpočet dodatečných ztrát ve vinutí vlivem skinefektu .....	18
3.1.3 Přepočet odporů a ztrát na pracovní teplotu .....	19
3.2 Ztráty naprázdno .....	19
4 Elektromagnetický a tepelný přepočet .....	21
4.1 Použitý transformátor .....	21
4.1.1 Vinutí transformátoru .....	22
4.1.2 Zjištění počtu závitů transformátoru .....	23
4.2 Výpočet parametrů transformátoru .....	23
4.2.1 Rozměry vinutí, vodičů a jmenovité hodnoty .....	24
4.2.2 Počty závitů .....	24
4.2.3 Magnetický obvod .....	25
4.2.4 Teoretický výpočet oteplení, parametry vinutí a vodičů .....	25
4.2.4.1 Určení součinitele přestupu $\alpha$ .....	26
4.2.5 Vypočítané hodnoty nakrátko a ztráty naprázdno .....	27
5 Návrh pracoviště .....	28
5.1 Schéma zapojení .....	29
6 Experimentální ověření navržené metodiky .....	30
6.1 Měření oteplovací křivky transformátoru .....	30
6.2 Měření ochlazovací křivky transformátoru .....	31
6.3 Analýza nepřesnosti měření .....	36
7 Použité přístroje .....	37
8 Porovnání transformátorů 3,3kVA a 20kVA .....	39
9 Závěr .....	42
10 Seznam literatury .....	43
11 Přílohy .....	44
11.1 Tabulka hodnot pro určení součinitele přestupu $\alpha$ [4] .....	44
11.2 Zadní strana výkonového analyzátoru [10] .....	45

## Seznam použitých symbolů

$\Delta$	změna veličiny	
R	odpor	[ $\Omega$ ]
$Z_n$	jmenovitá impedance	[ $\Omega$ ]
$R_k$	odpor nakrátko	[ $\Omega$ ]
$X_k$	reaktance nakrátko	[ $\Omega$ ]
$\rho$	měrný odpor	[ $\Omega/m$ ]
I	proud	[A]
J	proudová hustota	[A/mm <sup>2</sup> ]
$U_f$	fázové napětí	[V]
f	frekvence	[Hz; s <sup>-1</sup> ]
S	plocha	[mm <sup>2</sup> ; m <sup>2</sup> ]
$S_p$	chladicí plocha pro proudění	[mm <sup>2</sup> ; m <sup>2</sup> ]
$S_z$	chladicí plocha pro záření	[mm <sup>2</sup> ; m <sup>2</sup> ]
l	délka/výška	[m]
$l_k$	délka chladicího kanálu	[m]
h	výška	[m]
$h_\sigma$	střední délka siločáry rozptylového toku	[mm; m]
a	šířka vodiče	[mm]
$N_1$	počet závitů	[-]
o	obvod	[mm; cm]
$\vartheta$	teplota	[°]
$\vartheta_\infty$	ustálené teplota	[°C; K]
$\vartheta_0$	počáteční teplota	[°C; K]
t	čas	[s; min]
$\tau$	časová konstanta	[s]
m	hmotnost	[kg]
$\Upsilon$	měrná hmotnost	[kg/m <sup>3</sup> ]
g	tíhové zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$\mu_0$	permeabilita vakua	[Hm <sup>-1</sup> ]
c	měrná tepelná kapacita	[J/°Cm <sup>3</sup> ]
q	povrchové zatížení	[-]
$\beta$	činitel objemové roztažnosti chladiva	[-]
B	magnetická indukce	[T]
P	výkon	[W]
$P_\Omega$	ohmické ztráty	[W]
$P_d$	dodatečné ztráty	[W]
$P_{Fe}$	ztráty v železe	[W]
$P_h$	hysterezní ztráty	[W]
$P_v$	ztráty vířivými proudy	[W]
$P_{celk}$	celkové ztráty	[W]
$P_0$	ztráty naprázdno	[W]
$P_k$	ztráty nakrátko	[W]
$k_{dk}$	činitel dodatečných ztrát	[-]
$k_h$	Steinmetzův koeficient hysterezních ztrát	[-]
$k_v$	Steinmetzův koeficient ztrát vířivými proudy	[-]
n	Steinmetzův koeficient	[-]
a	Steinmetzův koeficient	[-]
b	Steinmetzův koeficient	[-]



B	Steinmetzův koeficient	[-]
$k_d$	Steinmetzův koeficient dodatečných ztrát	[-]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	[W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha_p$	součinitel přestupu tepla prouděním	[W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha_z$	součinitel přestupu tepla zářením	[W/m <sup>2</sup> K]
$k_1$	korekční činitel	[°C]
$\lambda$	měrná tepelná vodivost chladiva	[W/°Cm]
$\nu$	kinematická viskozita chladiva	[m <sup>2</sup> /s]
K	korekční činitel pro drsnost povrchu	[-]
B	tlak vzduchu	[Pa]
k	koeficient vztažený na teplotu	[-]
A	koeficient pro výpočet ztrát vlivem skinefektu	[-]
$\xi$	redukovaná šířka vodiče	[-]
m	počet vodičů	[-]
$k_{dvin}$	korekční činitel dodatečných ztrát	[-]
$\delta$	hloubka vniku	[m]
$\omega$	úhlová rychlost	[rad/s]

## Seznam obrázků a tabulek:

Obr. 1 - určování odporu vinutí v okamžiku vypnutí logaritmováním rozdílů naměřených odporů [8] .....	5
Obr. 2 - určení odporu vinutí v okamžiku vypnutí [8] .....	6
Obr. 3 – korekční činitel $k_1$ .....	9
Obr. 4 – mezní vrstva na ochlazovaném povrchu .....	11
Obr. 5 – střední šířka chladicího kanálu $\Delta_k$ v závislosti od výšky cívky (cívky blíže k jádru) .....	14
Obr. 6 – oteplovací a ochlazovací křivka [2] .....	15
Obr. 7 – aktivní části transformátoru ve 3D v modelovém prostředí Auto CAD 2015 ..	21
Obr. 8 - rozměry jádra transformátoru .....	22
Obr. 9 - rozměry vinutí transformátoru .....	22
Obr. 10 – určení součinitele přestupu tepla pro svislou stěnu 0,23 m .....	26
Obr. 11 – schématický řez oknem transformátoru .....	28
Obr. 12 - spojení sekundárního vinutí nakrátko .....	28
Obr. 13 - schéma zapojení při oteplování transformátoru .....	29
Obr. 14 - schéma měření ochlazovací křivky transformátoru .....	29
Obr. 15 – zapojení transformátoru .....	30
Obr. 16 - oteplovací křivka transformátoru .....	31
Obr. 17 - ochlazovací křivka při použití laboratorního stejnosměrného budiče 30 V ...	32
Obr. 18 - ochlazovací křivka transformátoru při napájení akumulátorem 30 .....	34
Obr. 19 - ochlazovací křivka s $\log R_w$ a lineární spojnicí trendu .....	35
Obr. 20 - pokles teploty po odpojení od střídavého napájení .....	36
Obr. 21 - průběh proudu během měření ochlazovací křivky .....	36
Obr. 22 – průběh proudu stejnosměrného měřicího obvodu v 10. – 11. Minutě .....	37
Obr. 23 - výkonový analyzátor Norma 4000 .....	37
Obr. 25 – transformátor 20kVA z bočního pohledu .....	39
Obr. 26 – boční pohled na transformátor 3,3kVA .....	40
Obr. 27 – transformátor 20kVA .....	40
Obr. 28 – transformátor 3,3kVA .....	41
Tab. 1 – hodnoty součinitele přestupu pro různá prostředí [4] .....	13
Tab. 2 – hodnoty měrného odporu v $\Omega m$ .....	17
Tab. 3 – hodnoty měrného odporu v $\Omega m^2/m$ .....	17
Tab. 4 – hodnoty pro měrnou hmotnost .....	17
Tab. 5 – štítek transformátoru .....	21
Tab. 6 – naměřená napětí na jednotlivých fázích ( $U_n = 100 V$ ) .....	23
Tab. 7 – vypočtený počet závitů .....	23
Tab. 8 – naměřená napětí na jednotlivých fázích ( $U_n = 150 V$ ) .....	23
Tab. 9 – vypočtený počet závitů .....	23
Tab. 10 - vypočítané hodnoty laboratorního transformátoru .....	24
Tab. 11 – hodnoty magnetické indukce B a napětí $U_2$ .....	24
Tab. 12 – hodnoty magnetického obvodu transformátoru .....	25
Tab. 13 – vypočítané hodnoty pro vinutí, vodiče a výpočet oteplení .....	25
Tab. 14 – vypočítané hodnoty nakrátko .....	27

# Úvod

Každým rokem stoupá spotřeba elektrické energie. Lidstvo si zvyklo na určitý standard, který chce stále zvyšovat a ruku v ruce s tím jde i spotřeba elektřiny. Tu je však zapotřebí ke konečnému spotřebiteli nějak dopravit. K tomu slouží soustava elektrických sítí, kterých je nedílnou součástí mnoho elektrických zařízení a mezi jedno z nejdůležitějších patří transformátor.

Transformátory jsou poměrně velká zařízení, která obsahují značné množství materiálu. Což znamená, že náklady na jejich výrobu jsou značně vysoké, proto je důležité, aby transformátor pracoval v rozmezí přijatelných pracovních podmínek a nedocházelo například k poškození izolace vlivem teploty. Protože oprava transformátorů je nejenom náročná, ale i drahá záležitost, budu se v této bakalářské práci zabývat oteplovací zkouškou suchého třífázového transformátoru.

Teplotní měření jsou velice důležitou částí diagnostiky elektrických strojů a zařízení. Jsou velmi důležitá pro jejich dlouhou životnost. Kvůli ztrátám vznikajícím uvnitř stroje dochází k ohřívání konstrukce. Při nadměrném oteplení stroje vzrůstá možnost poškození izolace, její rychlejší stárnutí, nebo okamžitá degradace, což obvykle vede k elektrickému průrazu izolace, zážehu obloukového výboje a ke zničení stroje. Tím, že se výrobci snaží tlačit výrobní náklady stále níže, se důležitost diagnostiky ještě zvyšuje. V dnešní době není problém změřit velice přesně teplotu. Problém může nastat pouze tehdy, je-li třeba změřit teplotu pohyblivých částí, např. rotoru elektrického motoru. U transformátoru komplikuje měření výše pracovních napětí. Další problém, který zde může nastat, je při měření teploty pomocí termočlánku. Magnetické pole, které se uvnitř transformátoru nachází, může zanechat chybu do měření.

Cílem práce je seznámení se s metodikami provádění oteplovacích zkoušek dle technických norem a následný návrh pracoviště pro experimentální ověření, provedení elektromagnetického přepočtu zvoleného transformátoru a následná realizace oteplovací zkoušky. Oteplovací zkouška bude provedena v náhradním zapojení nakrátko – zkratování sekundárního vinutí. Po dosažení ustáleného teplotního stavu aktivních částí transformátoru bude zkratováno sekundární vinutí napájené střídavým zdrojem rozpojeno a přepojeno na stejnosměrný měřicí obvod. Napájení stejnosměrného měřicího obvodu bude realizováno akumulátorem 30V. Data budou zaznamenávána výkonovým analyzátozem Norma 4000, který umožňuje spojitý odečet hodnot

měřených veličin: napětí a proudu. obvod realizovaným výkonovým analyzátozem Norma 4000 pro spojitý sběr hodnot měřených veličin: napětí a proudu. Z těchto hodnot bude následně vypočítán odpor vinutí, který se s klesající teplotou bude snižovat. Z naměřených hodnot následně bude provedena různými metodami extrapolace do času odpojení střídavého napájení, a tak bude zjištěno výsledné maximální oteplení laboratorního třífázového suchého transformátoru.

# **1 Realizace oteplovací zkoušky a výpočet oteplení (ČSN EN 60076-2; ČSN 35 1002)**

Tuto problematiku popisuje literatura [7] - ČSN EN 60076-2:1997 Výkonové transformátory – Část 2: Oteplení, která má status české technické normy. Nahrazuje starou technickou normu ČSN 35 1002 [8]. Upravuje rozsah platnosti, dovolené oteplení a oteplovací zkoušku. Dále jsou uvedeny hlavní zásady realizace oteplovací zkoušky dle této normy:

Zkušební metoda spočívá v oteplování transformátoru do ustáleného teplotního stavu jeho zatěžováním, při kterém dochází ve všech nebo v některých částech konstrukce ke ztrátám činné energie. Měří se oteplení těchto částí, které je vyšší než teplota okolí, aby se ověřilo, zda je oteplení v rozsahu předpisů upravujících dovolené oteplení.

Účelem zkoušky je:

- zjistit střední oteplení vinutí při připojení jmenovitého proudu
- v případě olejového transformátoru rovněž určení oteplení horní vrstvy oleje při ustáleném stavu

## **1.1 Teplota chladícího vzduchu**

V průběhu oteplovací zkoušky musí být provedena opatření pro omezení kolísání teploty chladícího vzduchu. Musí být použity nejméně tři měřicí sondy. Z naměřených hodnot se určí střední hodnota. Hodnoty se zaznamenávají buď v pravidelných intervalech, nebo spojitým záznamem.

Sondy musí být rozmístěny ve vzdálenosti 1 až 2 metry od nádoby transformátoru nebo od jeho chladících ploch. U transformátorů s nenucenou cirkulací vzduchu se sondy umisťují zhruba do poloviny výšky chladících ploch. U transformátorů s nucenou cirkulací chladícího vzduchu je potřeba, aby sondy zaznamenávaly teplotu vzduchu vstupujícího do chladících ploch. Je třeba dbát i na možnou recirkulaci ohřátého vzduchu.

## 1.2 Metody provedení oteplovací zkoušky

Zkoušky probíhají několika způsoby:

a) Metoda přímého zatížení

Jmenovitým napětím je napájeno jedno vinutí transformátoru a druhé vinutí je připojeno na zatížení, které odpovídá jmenovitému proudu ve vinutích, který se měří na zatížené straně.

b) Metoda vzájemného zatížení

Tato metoda vyžaduje dva transformátory, které se spojí paralelně. Tyto transformátory musí mít stejné jmenovité napětí i skupinu spojení. Napájení je realizováno jmenovitým napětím. U transformátorů se užívají různé převody regulováním nebo přivedením pomocného napětí a tím se nastaví ve vinutí testovaného transformátoru jmenovitý proud.

c) Metoda nakrátko

V průběhu zkoušky není transformátor vystaven zároveň jmenovitému proudu a jmenovitému napětí. Je vystaven vypočteným celkovým ztrátám, které se určují ze ztrát nakrátko při referenční teplotě a ze ztrát naprázdno.

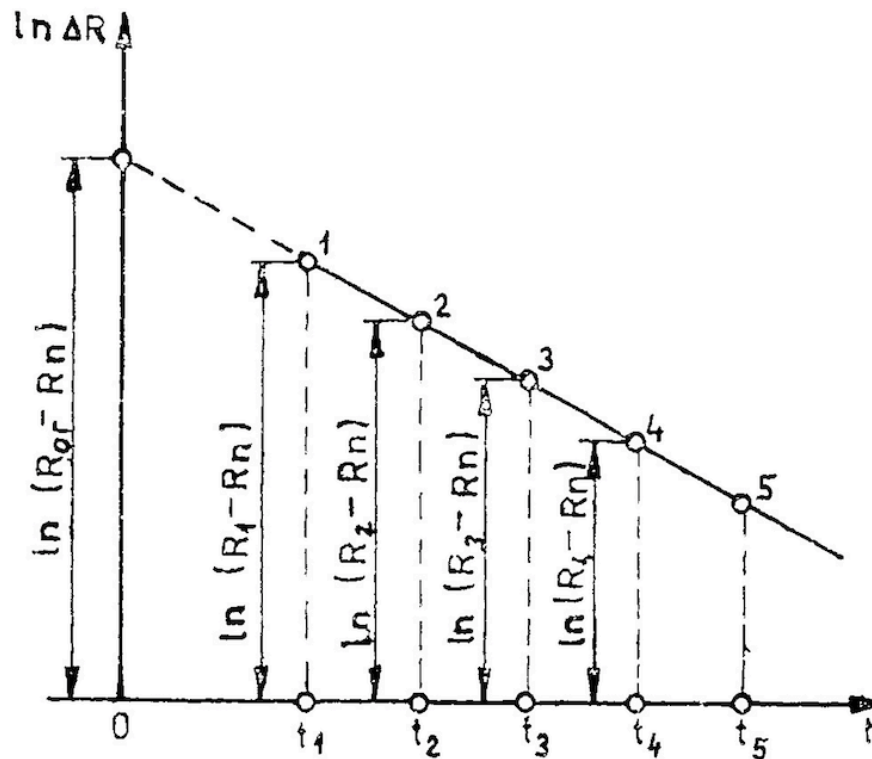
Jedno vinutí je spojeno nakrátko a druhé je napájené napětím, které se nesmí lišit o více než o 2% od jmenovitého. Toto napětí se nastaví, aby byl ve vinutí ustálený proud, při kterém jsou ztráty stejné jako normalizované.

Napětí je regulováno tak, aby byl ve vinutích ustálený proud, který se nesmí změnit nejméně po dobu jedné hodiny a určuje se hodnota střední teploty vinutí.

## 1.3 Určení odporu vinutí po odpojení od napájení

Po odpojení transformátoru od napájení se musí v co nejkratší době začít měřit odpor vinutí. Provádí se korekce hodnoty odporu vinutí na změnu odporu po dobu od odpojení do okamžiku změření teploty. Měření odporu probíhá okamžitě po odpojení, ale až po uplynutí doby, během které odezní přechodný jev v obvodu měřícího proudu.

Zjištění hodnoty odporu v maximální hodnotě v době odpojení se provádí extrapolací časových křivek změny odporu naměřených v době od odpojení napájecího zdroje do okamžiku změření.

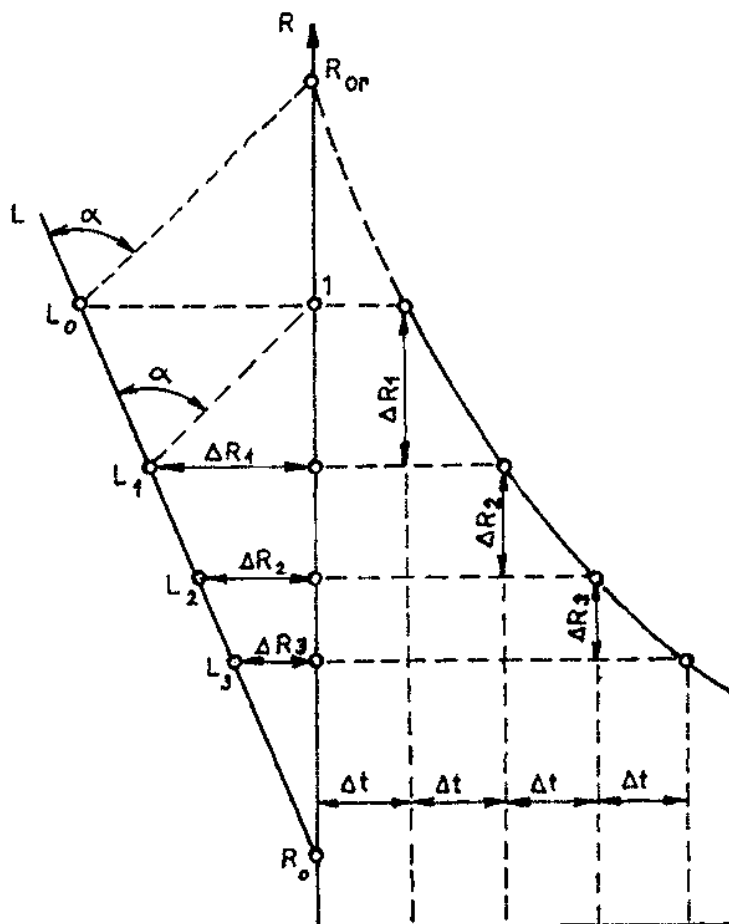


Obr. 1 - určování odporu vinutí v okamžiku vypnutí logaritmováním rozdílů naměřených odporů [8]

Oprava se provádí extrapolací lineární stupnicí. Extrapoluje se odpor vinutí do bodu odpojení a určuje se maximální střední teplota vinutí z hodnoty odporu při odpojení.

Proces extrapolace probíhá podle obrázku (Obr. 2). Změna odporů  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta R_3$  se určuje v konstantních časových intervalech  $\Delta t$ .

Poklesy hodnot odporů  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta R_3$  se stejnými intervaly se značí na ose y a vynese se přímka L. Spojením bodů  $L_1$  a 1 se zjistí úhel  $\alpha$ , pod kterým se vynese přímka, která protne osu y. Průsečíkem přímky a osy y získáme bod  $R_{or}$ , který odpovídá odporu vinutí v okamžiku odpojení.



Obr. 2 - určení odporu vinutí v okamžiku vypnutí [8]

#### 1.4 Určení střední teploty vinutí

Střední teplota vinutí se získává měřením odporu vinutí. Při zkoušce prováděné na třífázovém transformátoru je nejvhodnější realizovat měření na středním sloupci. Poměry mezi hodnotami odporů  $R_1$  při teplotě  $\vartheta_1$  a  $R_2$  při teplotě  $\vartheta_2$  se dá vyjádřit takto:

$$\text{pro měď: } \frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \vartheta_2}{235 + \vartheta_1} \quad (1)$$

$$\text{pro hliník: } \frac{R_2}{R_1} = \frac{225 + \vartheta_2}{225 + \vartheta_1} \quad (2)$$

kde  $R_1$  je odpor vinutí v  $\Omega$  při teplotě  $\vartheta_1$

$R_2$  je odpor vinutí v  $\Omega$  při teplotě  $\vartheta_2$

Hodnota odporu  $R_1$  se musí měřit za studena a hodnota odporu  $R_2$  se měří po odpojení napájecího zdroje. Možné je také určit odpor  $R_2$  bez odpojení napájecího zdroje, a to metodou superpozice, kdy se přivede malý měřicí stejnosměrný proud do vinutí, který se poté superponuje na zátěžný proud.



Referenční měření ( $R_1, \vartheta_1$ ) všech odporů vinutí se provádí na transformátoru při ustálené teplotě okolí. Pokud se  $R_2$  měří při jiné teplotě, pak hodnota teploty bude:

$$\text{pro měď: } \vartheta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \vartheta_1) - 235 \quad (3)$$

$$\text{pro hliník: } \vartheta_2 = \frac{R_2}{R_1} (225 + \vartheta_1) - 225 \quad (4)$$

Teplota vnějšího chladicího média v čase odpojení napájecího zdroje je  $\vartheta_a$ . Oteplení vinutí potom je:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_a \quad (5)$$

### 1.5 Určení teploty vinutí před odpojením napájecího zdroje

Pokud je prováděno oteplování transformátoru do ustáleného stavu metodou nakrátko, je požadováno, aby byla střední hodnota teploty vinutí určena těsně před odpojením napájecího zdroje. Standardně se používá tento postup:

Okamžitě po odpojení napájení a rozpojení zkratovaného vinutí se připojí měřící stejnosměrný obvod na vinutí každé fáze, která se má měřit. Důvěryhodné naměřené údaje se z důvodu velké elektrické konstanty ( $L/R$ ) vinutí získají až po určité době. Ochlazováním vinutí dochází v čase k poklesu odporu. Důležité je dostatečně dlouhé měření, které poskytne dostatek hodnot k extrapolaci do okamžiku odpojení napájecího zdroje.

### 1.6 Trvání oteplovacích zkoušek

Zkoušky je potřeba provádět do té doby, dokud nebude splněna jedna z následujících podmínek:

- a) Kontrolované oteplení se může změnit nejvýše o  $1^\circ\text{C}$  za hodinu během čtyř po sobě jdoucích měření realizovaných v intervalech minimálně 1 hodiny.
- b) Kontrolované oteplení se může zvýšit maximálně o  $3^\circ\text{C}$  během hodiny, potom se výsledné oteplení určuje graficky.

Pro urychlení oteplování transformátoru je normou povoleno na začátku zkoušky nastavit ve vinutí (po dobu 2 až 3 hodin při začátku zkoušky ze studeného stavu u olejových a maximálně po dobu 1 hodiny u suchých transformátorů) navýšený proud, nesmí však překročit 150% jmenovitého proudu transformátoru. Při použití chladičů

mohou být chladiče vypnuté až do 70% předpokládaného výsledného oteplení, pak se musí chladiče zapnout.

## 2 Metodika výpočtu oteplení

Metodika výpočtu oteplení vinutí elektrických strojů je v literatuře dostatečně popsána. Shoda mezi výpočtem na základě obecně platných teoretických vztahů je však do značné míry ovlivněna dodržováním technologických zásad, které jsou předmětem „know – how“ každého výrobce. Výrobou suchých transformátorů se v bývalé ČSR zabýval podnik BEZ Bratislava. V dalším čerpám ze zkušeností tohoto výrobce publikovaných v [2] - Jarošek, Jozef, & Rudolf Plencner. *Transformátory* Vyd. 1. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1961

### 2.1 Oteplení vinutí transformátoru s plynným dielektrikem

Pod tímto pojmem rozumíme vzduch. Ostatní plynná dielektrika jsou dražší a musí se skladovat v nádobě, na druhou stranu jiná plynná dielektrika mají lepší tepelnou vodivost.

Technické plyny: vzduch, kyslík a dusík mají při atmosférickém tlaku přibližně stejnou tepelnou vodivost, zatímco vodík ji má za stejných podmínek přibližně šestkrát vyšší.

V porovnání s olejem má vzduch šestkrát menší tepelnou vodivost, nemůže tedy nahradit olejem chlazený transformátor. Vzduchový transformátor má obvykle větší rozměry, chladicí kanály pro jednostranné odvádění potřebného množství tepla mají mít šířku minimálně 8 mm a od délky kanálu nad 600 mm se musí rozšířit. Proudové zatížení vodičů je průměrně jen poloviční než u olejových transformátorů, izolační vzdálenosti vůči zemi a mezi vinutími jsou přibližně dvojnásobné. Transformátory chlazené vzduchem musí mít mimořádně volnou konstrukci, přinejmenším v horní části, aby nedošlo ke škrcení vzduchu, a tím ke snížení jeho rychlosti proudění podél stěn.

Oteplení cívek můžeme spočítat podle vztahu:

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot S} \quad (6)$$

kde  $\alpha$  je číselný přestup  
 $S$  plocha cívek

Součinitel přestupu  $\alpha$  počítáme podle rovnice D-18/[2] nebo D-19/[2]. Cívky blíže k jádru hůř odvádí teplo, protože teplo se odvádí jen prouděním a vedením. U krajních cívek se uplatňuje i vliv záření.

Pokud se vzduchem chlazené transformátory navrhují podle obvyklých zásad pro dovolené oteplení, mají mít cívky přibližně stejné povrchové zatížení. Cívky mají většinou pouze svislé kanály, proto budeme počítat se součinitelem přestupu  $\alpha$  podle rovnice D-19/[2]. Potom je  $\Delta\vartheta$ :

$$\Delta\vartheta = \frac{q}{2,5^4 \sqrt{\frac{\Delta\vartheta}{l}}} \quad (7)$$

kde  $q$  je povrchové zatížení

$l$  je výška cívky

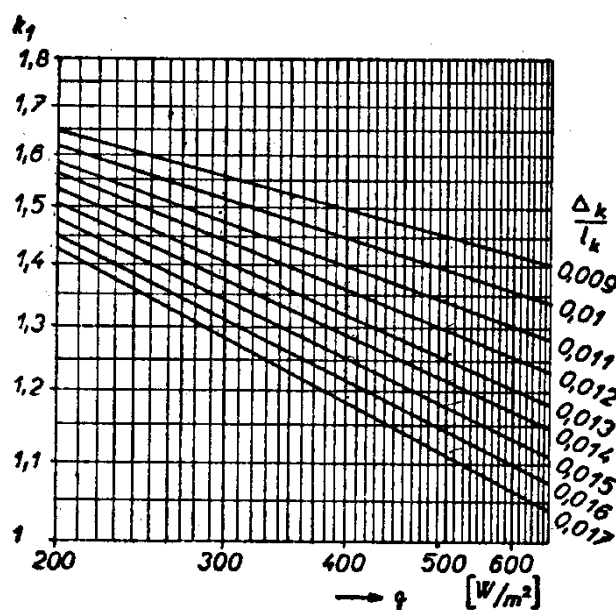
Osamostatněním  $\Delta\vartheta$  a úpravou dostaneme vztah pro oteplení cívek vzduchem chlazeného transformátoru, ze kterých se odvádí teplo prouděním a vedením.

$$\Delta\vartheta = \left(\frac{q}{2,5}\right)^{\frac{4}{5}} l^{\frac{1}{5}} \quad (8)$$

Vzorec součinitele přestupu byl odvozený pro svislou stěnu. Pro cívky, ze kterých je kvůli spojkám odvod tepla nahoře i dole částečně zhoršený, musíme počítat s korekčním činitelem. Potom má vztah pro výpočet tvar:

$$\Delta\vartheta = k_1 0,48 q^{0,8} l^{0,2} \quad [^{\circ}\text{C}; \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \text{m}] \quad (9)$$

Koeficient  $k_1$  je vynesena na diagramu na obrázku (Obr. 3).



Obr. 3 – korekční činitel  $k_1$

Koeficient  $k_1$  je vyneseno na diagramu na obrázku (Obr. 3) v závislosti od poměru střední šířky chladicího kanálu  $k$  jeho délce  $\frac{\Delta k}{l_k}$  a povrchového zatížení  $q$ . Šířka kanálu  $\Delta k$  je střední šířka chladicího kanálu, pro vinutí u jádra bereme v úvahu polovinu chladicího kanálu mezi jádrem a cívkou. Pokud z důvodu ztrát v cívce dostaneme vyšší oteplení, než je povolené normou, musíme zvětšit plochu o jednu chladicí stranu.

Výhodnější je vyrábět i krajní cívky jako polohové s chladícím kanálem uprostřed cívky. Jedna polovina cívky je jako vnitřní cívka a jen u krajní poloviny cívky se uplatní sálání. Proto můžeme i zde použít odvození chladících poměrů v závislosti na zatížení povrchu. Ve smyslu rovnice D-22/[2] a D-17/[2] na cívce, kde se odvádí teplo prouděním, vedením a zářením, se oteplení cívky dá vyjádřit:

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta P}{\alpha_p S_p + \alpha_z S_z} \quad (10)$$

kde  $\alpha_p$  je činitel přestupu tepla pro proudění  
 $\alpha_z$  je činitel přestupu tepla při záření  
 $S$  jsou plochy chladících ploch

## 2.2 Odvod tepla prouděním

Množství odvedeného tepla závisí na tepelné vodivosti, gradientu teploty, barvě povrchu a dalších činitelích prostředí, kterými se šíří. Intenzita proudění plynu je závislá na tvaru a délce prostoru, ve kterém se plyn pohybuje, a na tom, jestli proudí volně, anebo nuceně. Jedná se tedy o poměrně složitý děj závisející na více činitelích, které působí současně, takže i známé a používané vztahy pro výpočet jsou doplněny o opravné koeficienty získané empiricky.

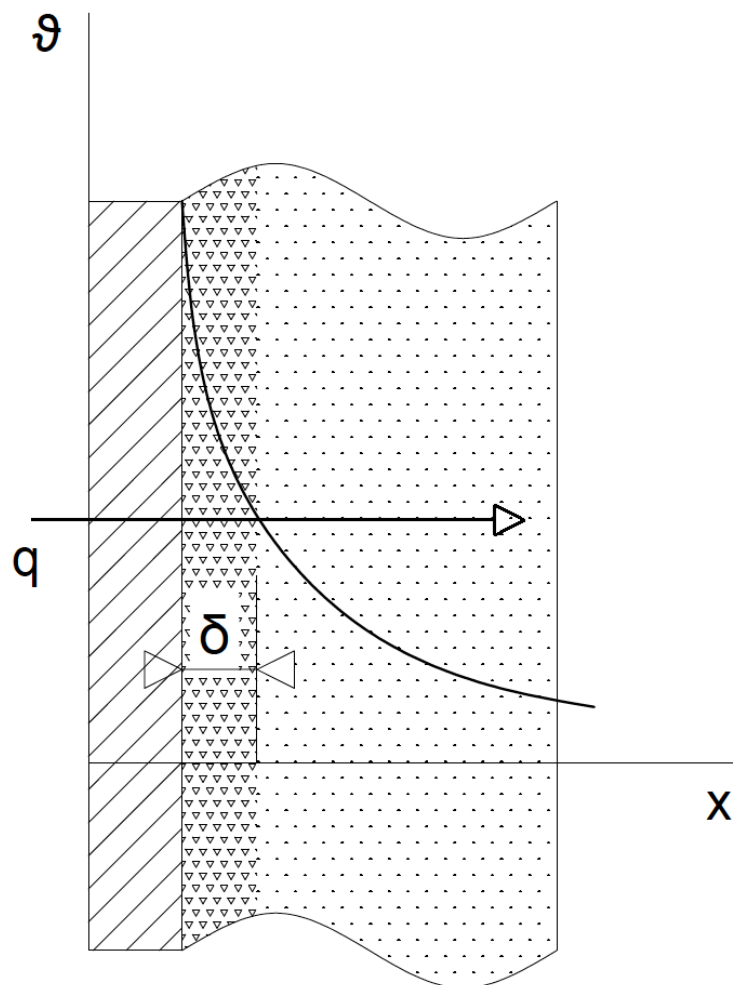
Proudění chladicího prostředí může být samo o sobě volné, anebo nucené. Volné proudění se bere v úvahu zejména při výrobě transformátorů a vzniká rozdílem specifických hustot zahřátých a chlazených částí kapaliny nebo plynu.

Intenzita proudění závisí na rozdílu teplot jednotlivých částí a velikostí prostoru, ve kterém tento děj probíhá. Nucené proudění je vyvolané vnějším účinkem, tedy např. ventilátorem nebo působením větru na povrch nádoby.

### 2.2.1 Druhy proudění a mezní vrstva

Do určité vzdálenosti od rozhraní se částice pohybují rovnoběžně se stěny. Takové proudění nazýváme v technické praxi laminární. Ve větší vzdálenosti od rozhraní částice nesledují směr obtékání stěn, promíchávají se a jejich pohyb je neuspořádaný. Takové proudění se nazývá turbulentní. Laminární proudění se mění na turbulentní, když překročí rychlost proudění určitou hranici, neboli kritickou rychlost, která závisí na chladicím prostředí a prostoru, ve kterém se pohybuje.

Podél svíslé stěny se vytváří tenká vrstva laminárního proudění, která se nazývá mezní vrstva  $\delta$ . V této vrstvě je rychlost proudění maximální těsně u stěny, prudce klesá v závislosti na vzdálenosti od stěny [14]. Teplo odvádí kolmo na směr proudění a je určované tepelnou vodivostí chladicího prostředí. Průběh změny teploty je principálně znázorněn na obrázku (Obr. 4).



Obr. 4 – mezní vrstva na ochlazovaném povrchu

### 2.3 Odvod tepla svislou stěnou

Odvod tepla z povrchu vedením není moc účinné, odvádí se pouze malé množství tepla, protože vzduch je špatný tepelný vodič. Kolem ohříváných stěn vznikne prouděním vztlak, který způsobí lepší odvod tepla. Odevzdáním tepla vzduchu, vzduch zmenší svou měrnou váhu a začne stoupat vzhůru. Na jeho místo se tlačí studený vzduch, který se následně může od stěn ohřát. Intenzita proudění vzduchu se zvyšuje s ohříváním tělesa. Vedení a proudění jsou spolu spjata, proto se počítají společně. Vztah pro hladkou svislou stěnu byl odvozen Lorenzem [1] ve tvaru:

$$\alpha = 0,548 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot c \cdot \beta \cdot \lambda^3 \cdot \Delta\vartheta}{\nu \cdot h}} \quad (11)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení  
 $c$  je měrné teplo chladiva (vzduchu)  
 $\beta$  je činitel objemové roztažnosti chladiva  
 $\lambda$  je měrná tepelná vodivost chladiva  
 $\nu$  je kinematická viskozita chladiva  
 $\Delta\vartheta$  je oteplení  
 $h$  je svislá výška stěny

Přibližné hodnoty veličin při provozní teplotě pro vzduch:

$$\begin{aligned}c &= 1200 \text{ Ws/}^\circ\text{Cm}^3 \\ \beta &= 1/300 \\ \lambda &= 0,027 \text{ W/}^\circ\text{Cm} \\ \nu &= 0,16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}\end{aligned}$$

Pro vzduch v klidném stavu tedy dostaneme:

$$\alpha = 1,46 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta\vartheta}{h}} \quad (12)$$

Vztah pro odvod tepla prouděním podél svislé stěny pro vzduch jako chladící médium lze také formulovat jako [2]:

$$\Delta\vartheta = (\vartheta_2 - \vartheta_1) = \frac{q}{\alpha} = -\frac{\Delta P}{S \cdot \alpha} \quad \left[^\circ\text{C}, \frac{\text{W}}{\text{m}^2}; \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}, \text{m}^2\right] \quad (13)$$

Součinitel přestupu tepla prouděním  $\alpha$  se může vyjádřit dle Richtera vztahu [2]:

$$\alpha = 6,5 + 0,005\Delta\vartheta \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}; ^\circ\text{C}\right] \quad (14)$$

nebo dle Montsingerova vztahu [2]:

$$\alpha = 2,17 \cdot K \cdot \sqrt[4]{\Delta\vartheta} \cdot \sqrt{B} \quad \left[\frac{W}{m^2}; \text{ } ^\circ C\right] \quad (15)$$

kde K je korekční činitel pro nerovnosti a drsnosti povrchu (1 pro úplně hladký povrch)

B je tlak vzduchu

Poměry při odvádění tepla se podstatně horší v případě horizontálních ploch. Všeobecně platí, že horizontální plochy na horní straně ochlazovaného objektu odvádějí teplo lépe až o 20%, ve srovnání s plochami na spodní straně objektu, kde musí ohřátý vzduch obtékat celou spodní plochu a až od hrany může stoupat. Pokud se uvnitř ochlazovaného tělesa volí úzké kanály, tj. v šířce menší, než je šířka mezní vrstvy, chovají se jako štěrbinové a tvoří tepelnou izolaci a zabraňují odvádění tepla [2].

V reálných podmínkách není plocha zcela rovná a její drsnost přináší lepší odvod tepla. Chladihost na výšce stěny je závislá méně než čtvrtou odmocninou. Proto můžeme brát, že  $\alpha$  na výšce stěny nezávisí, a tak se dá funkce  $\sqrt[4]{\Delta\vartheta}$  (ze vztahu(12)) rozvést v řadu, ze které se použijí pouze první dva členy. Výsledná závislost je přímkou v rozmezí oteplení od 10° do 100°, je tomu tedy stejně jako u sálání. [1]

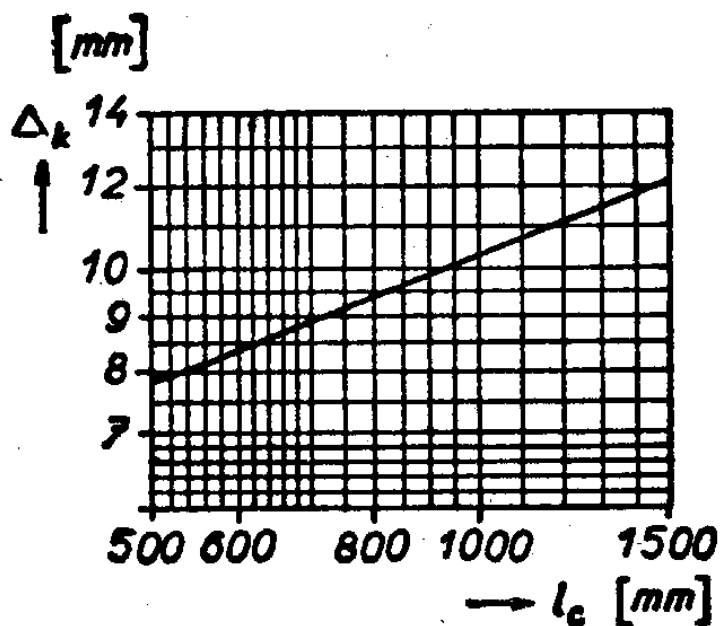
## 2.4 Určení součinitele přestupu pro svislou stěnu podle Lorenze

Využitím Lorenzova vztahu je možné určit součinitel přestupu pro svislou stěnu o zvolené výšce 0,5 m. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty  $\alpha$  pro tři různá chladiva: pro vzduch, vodu a olej. Hodnota tíhového zrychlení g byla do Lorenzova vztahu dosazena jako  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

			vzduch	voda	olej
c	měrné teplo	Ws/K/m <sup>3</sup>	1200	4200000	1650000
$\beta$	objemová roztažnost		0,003333333	0,00018	0,001
$\lambda$	tepelná vodivost	W/K/m	0,027	0,628	0,164
v	kinematická viskozita	m <sup>2</sup> /s	0,000016	0,000000475	0,00000257
$\Delta\vartheta$	Oteplení	K	60	60	60
h	svislá výška stěny	m	0,5	0,5	0,5
$\alpha$	součinitel přestupu	W/m <sup>2</sup> /K	4,780804088	452,2930362	131,678149

Tab. 1 – hodnoty součinitele přestupu pro různá prostředí [4]

Z velikosti součinitelů přestupu tepla pro jednotlivé tekutiny je zjevné, že intenzita chlazení přechodem z plynných médií na kapalná se zvýší přibližně o dva řády, přičemž voda je z tohoto hlediska nejlepším chladivem vzhledem k vysoké hodnotě specifického tepla. V daném případě je uvažována výška stěny půl metru, nicméně součinitel přestupu, který činí pouze cca.  $5 \text{ W/m}^2/\text{K}$  je platný pro volný poloprostor a je třeba ho redukovat na reálnou šířku chladicího kanálu. Velikost chladicího kanálu je třeba odvodit od šířky mezní vrstvy (Obr. 4), avšak v praxi je záležitostí „know-how“ každého výrobce a určuje se experimentálně. V této práci jsou využity zkušenosti závodu BEZ Bratislava publikované v [2] viz (Obr. 5).



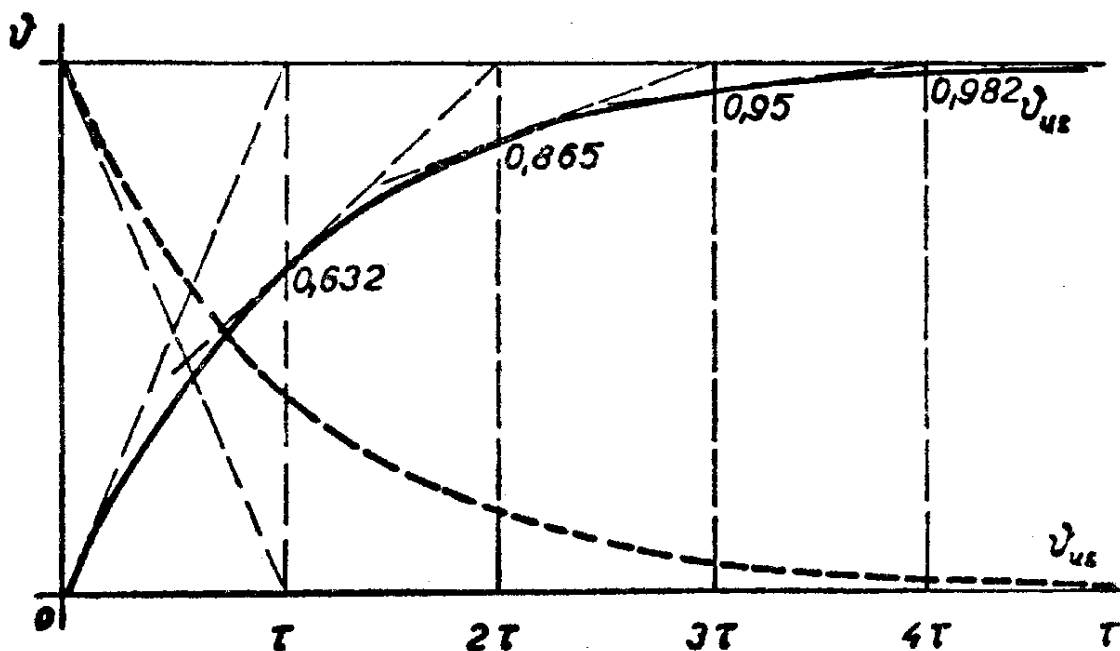
Obr. 5 – střední šířka chladicího kanálu  $\Delta_k$  v závislosti od výšky cívky (cívky blíže k jádru)

## 2.5 Přejídné tepelné vztahy

### 2.5.1 Oteplování

Při připojení transformátoru na síť předpokládáme nějakou teplotu okolí. V magnetickém obvodu vznikají ztráty naprázdno – jádro se ohřívá. Pokud by bylo možné umístění osamocené magnetického obvodu ve vakuu, ohřál by se na ustálenou teplotu za čas  $\tau$ . Tato teoretická možnost však neexistuje. Na magnetickém obvodu jsou uložena vinutí. Mezi nimi a jádrem je chladivo: olej, vzduch. Teplo vznikající v magnetickém obvodu se odevzdává do okolí, tj. chladiva a vinutí a v každém časovém okamžiku se zpožďuje vůči ideálnímu stavu. Neprobíhá po přímce, ale po křivce podle obrázku (Obr. 6). Podobně je to i s vinutím, když připojíme transformátor na zátěž.





Obr. 6 – oteplovací a ochlazovací křivka [2]

V každém okamžiku v transformátoru vznikají ztráty  $\Delta P$  (jádro, vinutí, chladiivo). V každé části jeho objemu vzniká stejná ztráta, která lze matematicky vyjádřit jako  $\Delta P \cdot dt$ . Každé těleso má svoje měrné teplo  $C$  [ $Ws/^\circ C$ ] (teplo, kterým se ohřeje o  $1^\circ C$ ) a ztrátami  $\Delta P \cdot dt$  se ohřívá na  $C \cdot d\vartheta$ . Těleso má svůj chladicí povrch, který stále na každý  $^\circ C$  odevzdává určité množství  $K$  ztrát [ $W/^\circ C$ ]. Při rozdílu teplot  $\vartheta$  mezi tělesem a okolím platí vztah:

$$\Delta P \cdot dt = C \cdot d\Delta\vartheta + K \cdot \Delta\vartheta \cdot dt \quad [Ws; \frac{Ws}{^\circ C}, ^\circ C, \frac{W}{^\circ C}, ^\circ C, s] \quad (16)$$

Rovnice může mít i tento tvar:

$$dt(\Delta P - K \cdot \Delta\vartheta) = C \cdot d\Delta\vartheta \quad (17)$$

Podle obrázku (Obr. 6) je vidět, že při ustáleném stavu se už těleso neohřívá a pravá strana rovnice se rovná nule. Pro tento stav můžeme určit  $K$ .

$$K = \frac{\Delta P}{\vartheta_\infty} \quad (18)$$

$K$  dosadíme do rovnice a dostaneme:

$$dt = \tau \cdot \frac{\Delta\vartheta_\infty \cdot C}{\Delta P} \quad (19)$$

kde  $\tau$  je časová konstanta

Řešením dostaneme rovnici:

$$\vartheta = \vartheta_\infty - (\vartheta_\infty - \vartheta_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (20)$$

Po úpravě dostaneme rovnici pro oteplovací křivku:

$$\vartheta = \vartheta_\infty \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad [^\circ C] \quad (21)$$

## 2.5.2 Ochlazování

Pokud chceme v ustáleném stavu transformátor vypnout, zopakujeme úvahu z rovnice (16). Když transformátor vypneme, levá strana rovnice se rovná nule.

$$0 = C \cdot d\vartheta + K \cdot \vartheta \cdot dt \quad (22)$$

Úpravou diferenciální rovnice dostaneme konečnou rovnici pro ochlazovací křivku, a to ve tvaru:

$$\vartheta = \vartheta_{\infty} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [^{\circ}C] \quad (23)$$

Také platí:

$$\vartheta = \vartheta_{\infty} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \vartheta_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (24)$$

Přibližně lze tedy říct, že za čas rovnající se čtyřnásobku časové konstanty dosáhlo těleso ustálený stav, pokud se ohřívalo, případně ochladilo, z ustáleného stavu za jistý čas prakticky na nulu.

## 3 Velikost odváděných ztrát

V aktivních částech transformátoru vznikají ztráty elektrické energie v magnetickém obvodu a ve vinutí, které se projevují jako tepelná energie. Ta se v magnetickém obvodu a ve vinutí šíří vedením, ale v důsledku je potřeba ji vždy předat do plynného okolí způsobem popsaným v předchozí kapitole, tj. prouděním a v menší míře i sáláním.

### 3.1 Ztráty nakrátko

Ztráty nakrátko jsou způsobovány zejména ohmickým odporem primárního a sekundárního vinutí, ale rovněž účinky rozptylového magnetického toku, způsobujícího ve vodivých částech vířivé proudy resp. skin efekt. Ztráty jsou tedy částí přenášené elektrické energie, která se ve vinutí transformátoru přemění na tepelnou energii, tj. na Jouleovo teplo, které způsobuje oteplení transformátoru.

Pro změření ztrát nakrátko je potřeba zkratovat sekundární vinutí a napájet transformátor sníženým napětím tak, aby proudy v napájeném a zkratovaném vinutí se rovnaly jmenovitým. A následně z naměřených hodnot určit interpolací napětí nakrátko. Napětí nakrátko se často udává v procentech jmenovitého napětí. Zde potom platí, že s vyšším napětím nakrátko je nižší proud nakrátko a tím tedy i ztráty ve vinutí.

### 3.1.1 Ztráty ve vinutí

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot 10^{-6} \quad (25)$$

kde  $\rho$  je měrný odpor v  $\Omega\text{m}$  v závislosti na teplotě podle [13]:

	20°C	75°C	115°C
Cu na vinutí	$\frac{1}{57} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{47} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{41} \cdot 10^{-6}$
Al na vinutí	$\frac{1}{35} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{28} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{26} \cdot 10^{-6}$
Klecové vinutí	$\frac{1}{30} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{24} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{22} \cdot 10^{-6}$

Tab. 2 – hodnoty měrného odporu v  $\Omega\text{m}$

Měrný odpor  $\rho$  v  $\Omega\text{m}^2/\text{m}$  v závislosti na teplotě podle [13]:

	20°C	75°C	115°C
Cu na vinutí	0,01754	0,02128	0,02439
Al na vinutí	0,02857	0,03571	0,03846
Klecové vinutí	0,03333	0,04167	0,04545

Tab. 3 – hodnoty měrného odporu v  $\Omega\text{m}^2/\text{m}$

Celková hmotnost železa se vypočte dle následujícího vzorce:

$$m = \gamma \cdot l \cdot S \quad (26)$$

kde  $\gamma$  je měrná hmotnost v  $\text{kg}/\text{m}^3$  podle [13]:

plechy pro elektrotechniku izotropní	7550
plechy pro elektrotechniku anizotropní	7650
vodiče Al	2700
vodiče Cu	8900

Tab. 4 – hodnoty pro měrnou hmotnost

$$\Delta P_K = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot \frac{\rho}{\gamma} \cdot 10^6 \cdot m \cdot J^2 \quad (27)$$

$$\Delta P_K = k \cdot m \cdot J^2 \quad (28)$$

kde  $k$  je koeficient vztažený na teplotu 75°C:

$$k = 2,4 \quad \text{pro Cu vodiče}$$

$$k = 12,75 \quad \text{pro Al vodiče}$$

(V koeficientu  $k$  nejsou zahrnuty počty fází, v případě trojfázového systému je tedy potřeba dosazovat celkovou hmotnost.)

### 3.1.2 Výpočet dodatečných ztrát ve vinutí vlivem skinefektu

Ve vinutí transformátoru vznikají ztráty vlivem vířivých proudů, které jsou buzeny rozptylovou složkou magnetického pole.

Dodatečné ztráty v jednotlivých vinutích protékaných střídavým proudem sinusového průběhu způsobené skinefektem se dle [15], [16] vypočítají podle následujícího vztahu:

$$k_{avin} = 1 + \frac{P_{v, sin}}{P_{\Omega}} = \varphi(\xi) + A\Psi(\xi) \quad (29)$$

kde

$$A = \frac{m^2 - 1}{3} \quad (30)$$

$$\varphi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi + \cos 2\xi} = 1 + \frac{4}{45}\xi^4 - \frac{16}{4725}\xi^8 + \frac{88448}{638512875}\xi^{12} - \dots \quad (31)$$

$$\Psi(\xi) = 2\xi \frac{\sinh \xi + \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} = \frac{1}{3}\xi^4 - \frac{17}{1260}\xi^8 + \frac{691}{1247400}\xi^{12} - \dots \quad (32)$$

Dále se aplikuje rozvoj do mocninné řady a dostáváme zjednodušený vztah:

$$k_{avin} = 1 + \frac{5m^2 - 1}{45} \cdot \xi^4 \quad (33)$$

kde  $m$  je počet vodičů kolmo na silové čáry rozptylového toku

$\xi$  je tzv. redukovaná šířka vodiče:

$$\xi = \frac{a}{\delta} \quad (34)$$

kde  $a$  je šířka vodiče

$\delta$  je hloubka vniku.

Hloubka vniku  $\delta$  se určí ze známého vzorce:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma}} \quad (35)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua

$\gamma$  je vodivost

Pro praktický výpočet dodatečných ztrát ve vinutí transformátoru se ve vztahu pro  $\delta$  respektuje ještě poměr výšky vinutí ke střední délce siločáry rozptylového toku.

$$\xi = a \cdot \sqrt{(\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \gamma) \cdot \left(\frac{h_{\sigma}}{h}\right)} \quad (36)$$

### 3.1.3 Přepočítání odporů a ztrát na pracovní teplotu

Přepočítání odporů a ztrát se provádí dle [7] na pracovní teplotu  $\vartheta = 75^\circ\text{C}$ .

Dále je uvedena závislost ztrát na teplotě a přepočítání na pracovní teplotu..

Ohmické odpory jsou funkcí změny teploty:

$$R_{\Omega} = f(\Delta\vartheta) \quad (37)$$

Přepočítání ohmických odporů měřených při teplotě  $\vartheta_k$ :

$$R_{75} = \frac{235+75}{235+\vartheta_k} \cdot R_k \quad (38)$$

Přepočítání ohmických ztrát, které jsou také funkcí změny teploty (s rostoucí teplotou rostou):

$$P_{\Omega 75} = f(\Delta\vartheta) = \frac{235+75}{235+\vartheta_k} \cdot P_{\Omega} \quad (39)$$

Přepočítání dodatečných ztrát (s rostoucí teplotou klesají):

$$P_{d75} = P_{sin} - P_{\Omega} = \frac{235+\vartheta_k}{235+75} \cdot P_d \quad (40)$$

V daném případě je vinutí vyrobené z hliníkového vodiče, proto je třeba zaměnit číselnou konstantu 235 hodnotou 225.

## 3.2 Ztráty naprázdno

Ke ztrátám v magnetickém materiálu dochází v důsledku jeho vystavení účinkům magnetického toku. Skutečná fyzikální podstata tohoto jevu ještě není zcela přesně známa, proto se tato problematika zjednodušeně vysvětluje podle [11] takto:

Energie vnějšího magnetického pole způsobuje pohyb doménové struktury uvnitř magnetického materiálu, tj. změnu orientace domén a změnu jejich velikosti. Při oslabení nebo úplném vymizení vnějšího magnetického pole dochází k okamžitému návratu domén do stavu odpovídajícímu nové hodnotě magnetického pole, eventuálně do stavu bez působení vnějšího magnetického pole. Energie způsobující pohyb domén je tudíž nevratná a přeměňuje se na ztrátové teplo uvnitř magnetického materiálu. Rychlost, kterou se vnější magnetické pole mění, má velký vliv na velikost ztrát. Ty jsou proto úměrné frekvenci změny magnetického pole. Metalurgická struktura magnetického materiálu ovlivňuje elektrickou vodivost a má rovněž značný vliv na velikost ztrát. V elektrických strojích jsou výše popsané složky ztrát nazývány ztrátami v železe.

Tradičně se dle Steinmetzova vztahu ztráty v železe  $P_{Fe}$  dělí do dvou složek na ztráty hysterezní  $P_h$  a ztráty vířivými proudy  $P_v$ .

$$P_{Fe} = P_h + P_v = k_h \cdot f \cdot B^n + k_v \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (41)$$

kde  $f$  je frekvence vnějšího magnetického pole

$B$  je magnetická indukce

$k_h$ ,  $k_v$  a  $n$  jsou koeficienty, které jsou závislé na laminaci, tloušťce a vodivosti materiálu a na dalších faktorech

Velikost ztrát v železe je za předpokladu sinusového průběhu úměrná velikosti indukce magnetického pole a frekvence. Experimentálně lze ztráty v železe ověřit měřením standardní metodou na Epsteinově vzorku.

Steinmetzův vztah ve tvaru (38) dává ve vztahu k měření dobré výsledky v lineární oblasti magnetizační křivky, to znamená do cca. 1T, což však pro elektrické stroje není obvyklý stav. Pokud je magnetická indukce vyšší než 1T nebo se zvyšuje frekvence magnetického pole, vykazuje výpočet dle rovnice (38) oproti měření značné rozdíly.

Pro korekci těchto odchylností byly vytvářeny různé teorie, založené na použití teorie doménové struktury. Nejčastěji je používán vztah (39):

$$P_{Fe} = P_h + P_v = k_h \cdot f \cdot B^{(a+bB)} + k_v \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (42)$$

kde  $a$  a  $b$  jsou konstanty a exponent indukce ve složce hysterezních ztrát se mění lineárně s magnetickou indukcí

Ztráty v jádře hrají stále významnější roli jak ve výrobě elektrických strojů, tak ve vlastní výrobě elektrotechnické oceli. Výzkum v tomto ohledu prodělal významný pokrok v chápání fyzikálních principů magnetizace a závislosti ztrát v železe na maximální hodnotě magnetické indukce, frekvence magnetizace a mikrostruktury v magneticky měkkých materiálech. Podle současných poznatků jsou nejčastěji ztráty v železe určovány podle vztahu:

$$P_{Fe} = P_h + P_v + P_d = k_h \cdot f \cdot B^n + k_v \cdot f^2 \cdot B^2 + k_d \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5} \quad (43)$$

kde  $P_d$  jsou dodatečné ztráty

$k_d$  je činitel související s tloušťkou, plochou příčného řezu a vodivostí materiálu a jedná se o parametr, který popisuje mikrostrukturu materiálu

Rovnice (40) vykazuje dobré výsledky v porovnání s naměřenými hodnotami. Byly však zjištěny jisté nepřesnosti, které signalizují skutečnost, že činitel  $k_d$  není konstantní ale závislý na velikosti magnetické indukci.

Ve své práci dále pracuji s vztahem dle (40), který je základním vztahem ve většině simulačních programů.

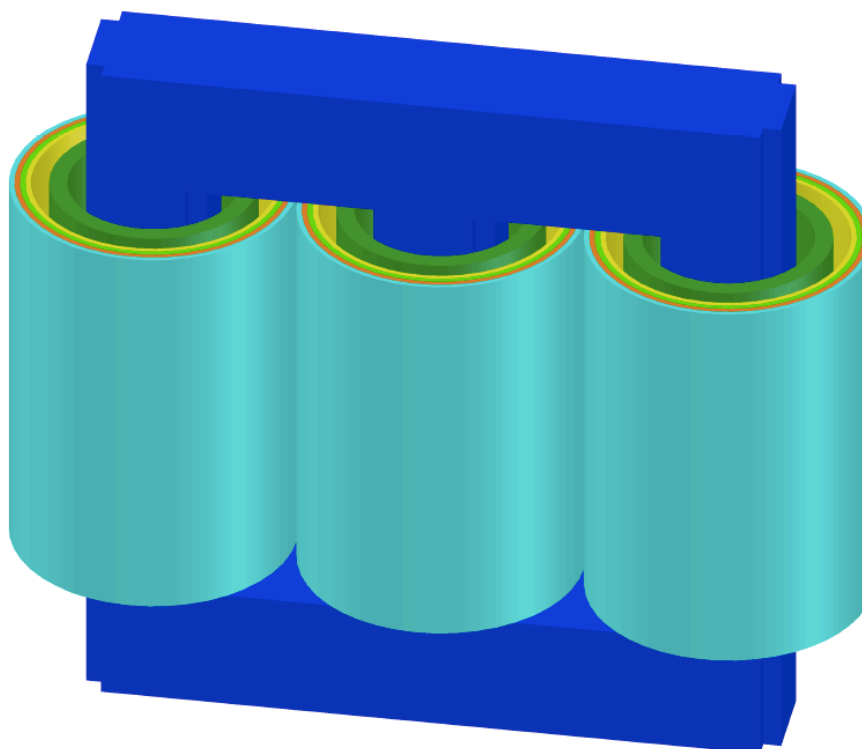
## 4 Elektromagnetický a tepelný přepočít

### 4.1 Použitý transformátor

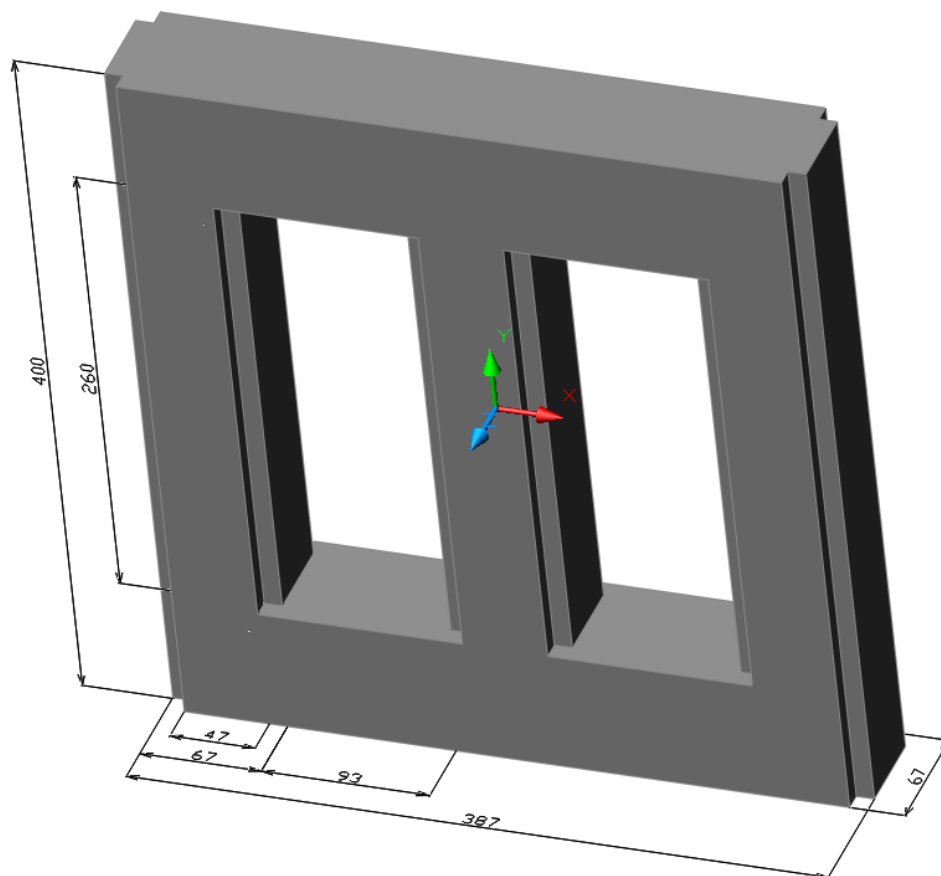
K měření byl použit laboratorní suchý třífázový transformátor o typovém výkonu 3,3kVA. Transformátor byl vyroben firmou Elektrov Jevišovice v roce 1966. Štítkové hodnoty transformátoru jsou uvedeny v tabulce (Tab. 5). Rozměry magnetického obvodu jsou uvedeny na obrázku (Obr. 8).

PRIM		POČET FÁZÍ	3	FÁZE
3 x 380	V	VÝKON	3,3	KVA
5	A	POHON	$\infty$	MIN
SEK		KMITOČET	50	~
3 X 4 X 60	V	ČÍSLO	6758	
5	A	ROK	1966	

Tab. 5 – štítek transformátoru



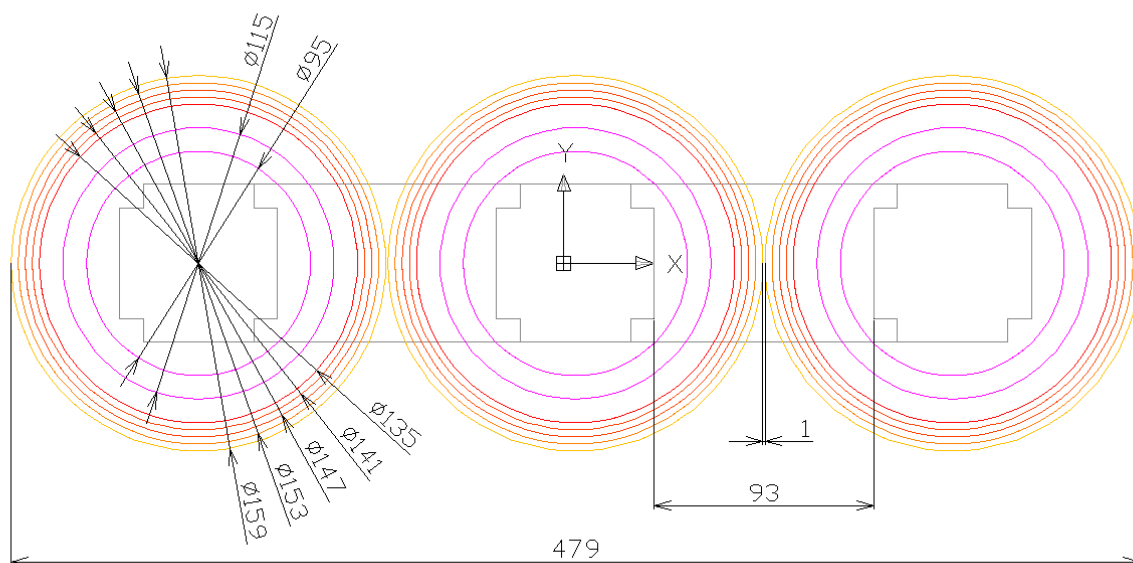
Obr. 7 – aktivní části transformátoru ve 3D v modelovém prostředí Auto CAD 2015



Obr. 8 - rozměry jádra transformátoru

#### 4.1.1 Vinutí transformátoru

Transformátor má polohové vinutí, pro každou fázi jeden válec. V každém válci se blíže k jádru nachází primární vinutí. Sekundární vinutí je od primárního vinutí odděleno chladicími kanály. Vinutí je na obrázku (Obr. 9).



Obr. 9 - rozměry vinutí transformátoru



### 4.1.2 Zjištění počtu závitů transformátoru

Pro zjištění počtu závitů primárního a sekundárního vinutí bylo potřeba navinout na vinutí jedné fáze určitý počet závitů. Na vinutí fáze A bylo navinuto 5 závitů, na kterých bylo naměřeno napětí, jež je uvedeno v tabulkách (Tab. 6) a (Tab. 8). Bylo spočítáno napětí na jeden závit a následně určen počet závitů primárního a sekundárního vinutí, které je uvedeno v tabulkách (Tab. 7) a (Tab. 9). Pro kontrolu bylo závitové napětí měřeno při dvou hodnotách napájecího napětí (100 V a 150 V).

#### Napájecí napětí 100 V:

	U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]	U4 [V]	U5 [V]	U [V] 5 ZÁVITŮ
Fáze A	63,7	17,8	17,8	17,88	17,87	1,329
Fáze B	63,9	17,94	17,89	17,89	17,88	
Fáze C	64,3	18,03	17,99	17,99	17,96	

Tab. 6 – naměřená napětí na jednotlivých fázích ( $U_n = 100$  V)

U [V] 1 závitů	Počet závitů prim. vinutí	Počet záv. sekund. vin. v 1 sekci
0,2658	240	67

Tab. 7 – vypočtený počet závitů

#### Napájecí napětí 150 V:

	U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]	U4 [V]	U5 [V]	U [V] 5 ZÁVITŮ
Fáze A	93	25,98	26,03	26,05	26,06	1,939
Fáze B	93,1	26,07	26,06	26,03	26,03	
Fáze C	93,3	26,26	26,24	26,19	26,18	

Tab. 8 – naměřená napětí na jednotlivých fázích ( $U_n = 150$  V)

U [V] 1 závitů	Počet závitů prim. vinutí	Počet záv. sekund. vin. v 1 sekci
0,3878	240	67

Tab. 9 – vypočtený počet závitů

Měřením byl určen počet závitů primárního vinutí na 240 závitů na fázi a na sekundárním vinutí na 268 závitů, tj. 4 sekce po 67 závitech.

## 4.2 Výpočet parametrů transformátoru

Pro výpočet byla vytvořena šablona v prostředí Microsoft Excel dle [5]. Šablona umožňuje výpočet základních parametrů, jako jsou fázové proudy, napětí, počty závitů a rozměry vodičů. Na základě volby rozměrů magnetického obvodu, které byly v daném případě určeny odměřením na laboratorním transformátoru jsou dále počítány hmotnosti, ztráty v železe. Na základě volby rozložení vinutí v okně magnetického

obvodu jsou dále určovány hmotnosti, ztráty a oteplení vinutí. Dále jsou určeny parametry náhradního schématu zejména reaktance nakrátko a činné odpory vinutí.

#### 4.2.1 Rozměry vinutí, vodičů a jmenovité hodnoty

V tabulce (Tab. 10) jsou uvedeny štítkové hodnoty pro laboratorní transformátor, modře označená pole jsou zadané hodnoty a bílá pole jsou vypočítané hodnoty. V levé části tabulky jsou hodnoty pro primární vinutí transformátoru a v pravé části pro sekundární vinutí.

V předchozí kapitole byl proveden výpočet počtu závitů. Po porovnání s údaji z tabulky (Tab. 10) je vidět, že transformátor je značně předdimenzován, a to i v hodnotě průřezu vodičů.

Typový výkon	kVA	3,30	Kmitočet	Hz	50,00
Napětí primáru	V	400,00	Napětí sekundáru	V	415,00
Spojení primáru	-	Y	Spojení sekundáru	-	Y
Proud	A	4,76	Proud sekundáru	A	4,59
Proud hust. (zvol.)	A/mm <sup>2</sup>	2,00	Proud hust. (zvol.)	A/-mm <sup>2</sup>	2,00
Potřebný průřez	mm <sup>2</sup>	2,38	Potřebný průřez	mm <sup>2</sup>	2,30
Paralelních drátů	-	1,00	Paralelních drátů	-	1,00
Šířka vodiče	mm	0,89	Šířka vodiče	mm	0,87
Výška vodiče	mm	2,67	Výška vodiče	mm	2,62
Šířka vodiče	mm	2	Šířka vodiče	mm	2,00
Výška vodiče	mm	2,50	Výška vodiče	mm	2,50
Průřez svazku	mm <sup>2</sup>	5,00	Průřez svazku	mm <sup>2</sup>	5,00
Proud hust. (vypoč.)	A/mm <sup>2</sup>	0,95	Proud hust. (vypoč.)	A/mm <sup>2</sup>	0,92
Fázové napětí	V	230,94	Fázové napětí	V	239,60
Fázový proud	A	4,76	Fázový proud	A	4,59
Počet závitů	-	228,32	Počet závitů	-	236,88

Tab. 10 - vypočítané hodnoty laboratorního transformátoru

#### 4.2.2 Počty závitů

V tabulce (Tab. 11) je pro zadané napájecí napětí 400 V na primárním vinutí, které má počtem závitů  $N_1 = 240$ , vypočítané napětí na sekundárním vinutí pro vypočtený počet závitů 268 a toto napětí je rovno 446,67 V.

$U_1$	$N_1$	B	$N_2$	$U_2$
400	240	0,87	268,00	446,67

Tab. 11 – hodnoty magnetické indukce B a napětí  $U_2$

Výpočet magnetická indukce:

$$B = \frac{U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot S_{j\acute{a}dra}} \cdot 10^6 \quad (44)$$

### 4.2.3 Magnetický obvod

V tabulce (Tab. 12) jsou hodnoty pro magnetický obvod transformátoru. V modrých polích jsou zadány rozměry magnetického obvodu a v bílých polích vypočten průřez jádra a celková váha železa.

$$m_{Fe} = \frac{[C] \cdot [D] \cdot (4 \cdot [B] + 3 \cdot [A] + 6 \cdot [C]) \cdot 7650}{10^9} \quad (45)$$

Šířka jádra [C]	mm	73,00
Stah jádra [D]	mm	73,00
Šířka okna [B]	mm	90,00
Výška okna [A]	mm	260,00
Průřez jádra	mm <sup>2</sup>	5062,55
Váha železa	kg	64,33
Volba indukce	T	0,90

Tab. 12 – hodnoty magnetického obvodu transformátoru

### 4.2.4 Teoretický výpočet oteplení, parametry vinutí a vodičů

V tabulce (Tab. 13) jsou uvedeny hodnoty, které byly počítány dle vzorců uvedených pod tabulkou.

		kanál 1	vinutí 1	kanál 2	vinutí 2
Šířka	mm	15,00	18,00	14	18,00
Obvod interní	mm	292,00	386,25	499,35	587,31
Obvod externí	mm	386,25	499,35	587,31	700,41
Obvod střední	mm	339,12	442,80	543,33	643,86
Počet závitů	-		240,00		268,00
Šířka vodiče	mm		2,00		2,00
Výška vodiče	mm		2,50		2,50
Vodičů radiálně	-		1,00		1,00
Vodičů axiálně	-		1,00		1,00
Počet vrstev	-		4,00		4,00
Počet závitů na vrstvu	-		60,00		67,00
Šířka vinutí	mm		8,00		8,00
Výška vinutí	mm		152,50		170,00
Průřez vodiče	mm <sup>2</sup>		5,00		5,00
1 cívka	kg		1,43		2,33
Celková hmotnost 3f	kg		4,30		6,99
Celkové ztráty	W		48,82		73,65
Výška vinutí	mm		230,00		230,00
Součinitel přestupu	W/m <sup>2</sup> /K		4,00		4,00
Povrch cívky fáze	m <sup>2</sup>		0,14		0,22
Činitel zakrytí povrchu	-		0,50		0,60
Teplosměnný povrch	m <sup>2</sup>		0,07		0,13
Oteplení	K		60,25		46,73

Tab. 13 – vypočítané hodnoty pro vinutí, vodiče a výpočet oteplení

Hmotnost jedné cívky:

$$m_{1cív} = \frac{S_{vod} \cdot O_{stř.vin1} \cdot N_{vrstev} \cdot N_{záv/vrstvu} \cdot \rho_{Al}}{10^9} \quad (46)$$

Celkové ztráty:

$$P_{celk} = k \cdot m_{3cív} \cdot J^2 \quad (47)$$

kde  $k = 12,75$  (viz kapitola 3.1.1)

Povrch cívky fáze:

$$S_{cívky} = \frac{2 \cdot O_{stř.vin1} \cdot h_{vin1}}{10^6} \quad (48)$$

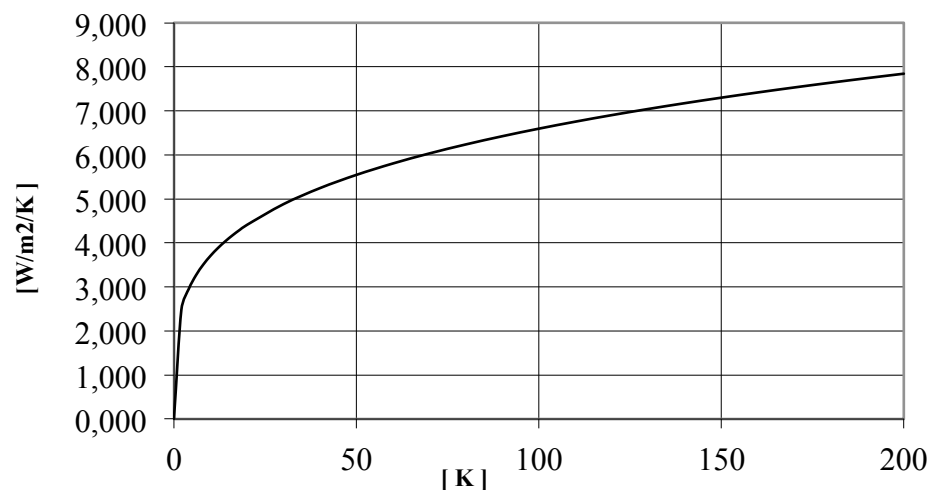
Z důvodu zakrytí chladících kanálů byl zvolen činitel zakrytí povrchu u primárního vinutí 0,5 a u sekundárního vinutí 0,6; neboť sekundární vinutí má odkryté krajní chladící kanály. Po vynásobení povrchu cívky jedné fáze tímto činitelem, získáme teplosměnný povrch.

Oteplení:

$$Oteplení = \frac{P_{celk}}{\alpha \cdot S_{teplosměnný} \cdot 3} \quad (49)$$

#### 4.2.4.1 Určení součinitele přestupu $\alpha$

Součinitel přestupu byl volen dle následujícího grafu, který čerpal z výzkumné práce [4]: (Obr. 10). Pro pokojovou teplotu 20 stupňů Celsia, která byla během měření naměřena a součinitel přestupu odpovídá zhruba hodnotě  $\alpha = 4$ . Data pro sestavení grafu jsou uvedena v příloze 11.1.



Obr. 10 – určení součinitele přestupu tepla pro svislou stěnu 0,23 m

#### 4.2.5 Vypočítané hodnoty nakrátko a ztráty naprázdno

V tabulce (Tab. 14) jsou uvedeny vypočítané hodnoty nakrátko a ztráty naprázdno. Příslušné vzorce jsou uvedeny pod tabulkou.

Jmenovitá impedance	$\Omega$	48,48
Odpor nakrátko	$\Omega$	1,80
Reaktance nakrátko	$\Omega$	1,40
Odpor nakrátko	%	3,71
Reaktance nakrátko	%	2,89
Napětí nakrátko	%	4,70
Ztráty nakrátko	W	146,97
Ztráty naprázdno	W	78,32

Tab. 14 – vypočítané hodnoty nakrátko

Jmenovitá impedance:

$$Z_n = \frac{U_f}{I_f} \quad (50)$$

Odpor nakrátko:

$$R_k = \frac{P_{celk.vin1} + P_{celk.vin2}}{3 \cdot I_f^2} \quad (51)$$

Reaktance nakrátko:

$$X_K = 7,9 \cdot N_{z\u00e1v.vin1}^2 \cdot f \cdot O_{st\u0159.vkan2} \cdot a_R \cdot \frac{1}{h_{vin1}} \cdot 10^9 \quad (52)$$

$$a_R = \frac{kan\u00e1l_{vin1} + kan\u00e1l_{vin2}}{3} + kan\u00e1l_{kan2} \quad (53)$$

Ztráty nakrátko:

$$P_k = k_{dk} \cdot (P_{celk.vin1} + P_{celk.vin2}) \quad (54)$$

kde  $k_{dk}$  je činitel dodatečných ztrát a v daném případě, pro potřeby elektromagnetického a tepelného výpočtu stroje uvažujeme 20%

Ztráty naprázdno:

$$P_0 = k_{d0} \cdot m_{Fe} \cdot p_{1,7T} \cdot \left(\frac{B}{1,7}\right)^2 \quad (55)$$

kde  $k_{d0}$  je činitel dodatečných ztrát a v daném případě uvažujeme také 20%

$$p_{1,7T} = 4 [W/kg]$$

Výpočet dodatečných ztrát  $k_d$  (viz 3.1.1 a 3.1.2):

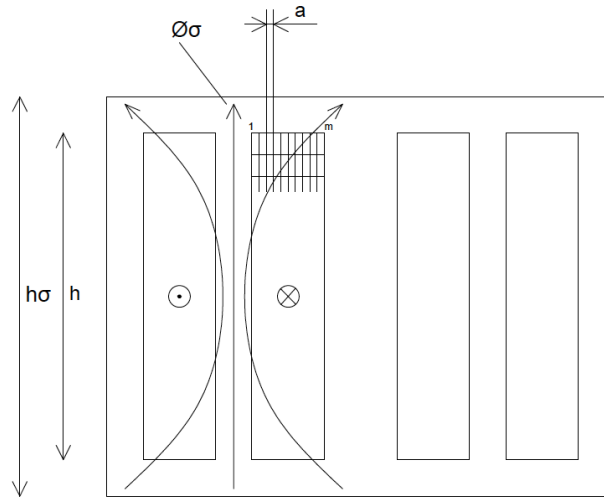
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 38}} = 11,5492 \quad (56)$$

$$\xi = \frac{a}{\delta} = \frac{2,5}{11,5492} = 0,2165 \quad (57)$$

$$k_d = 1 + \frac{5 \cdot m^2 - 1}{45} \cdot \xi^4 = 1 + \frac{5 \cdot 4^2 - 1}{45} \cdot 0,2165^4 = 1,0039 \quad (58)$$

Redukovaná šířka vodiče s respektováním poměru výšky vinutí ke střední délce siločáry rozptylového toku.

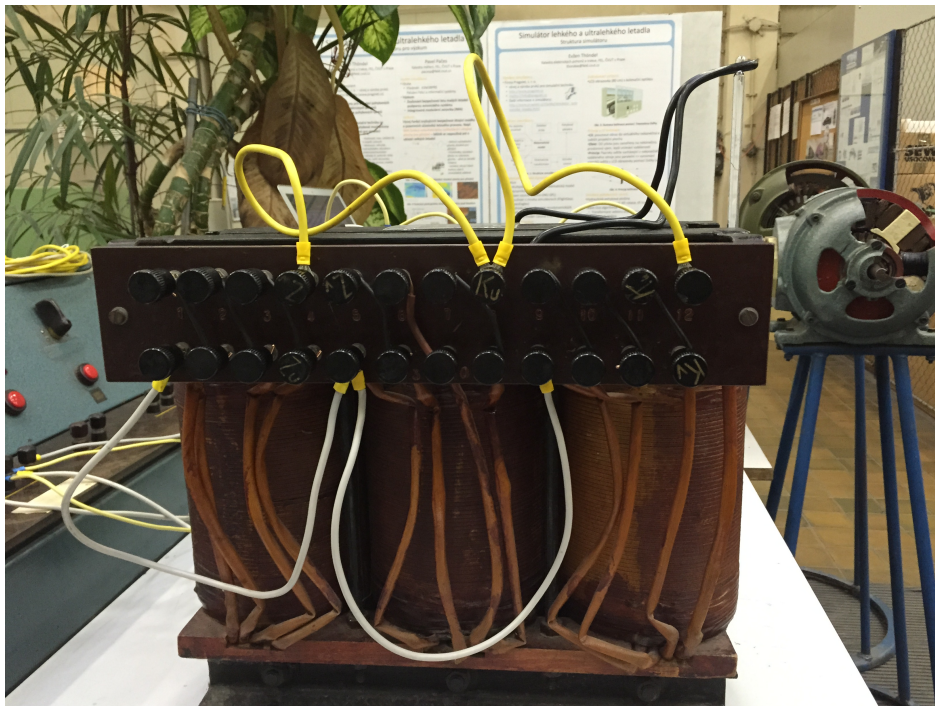
$$\xi = a \cdot \sqrt{(\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \gamma) \cdot \left(\frac{h_\sigma}{h}\right)} = 2,5 \cdot \sqrt{(\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 38) \cdot \left(\frac{400}{260}\right)} = 0,2686 \quad (59)$$



Obr. 11 – schématický řez oknem transformátoru

## 5 Návrh pracoviště

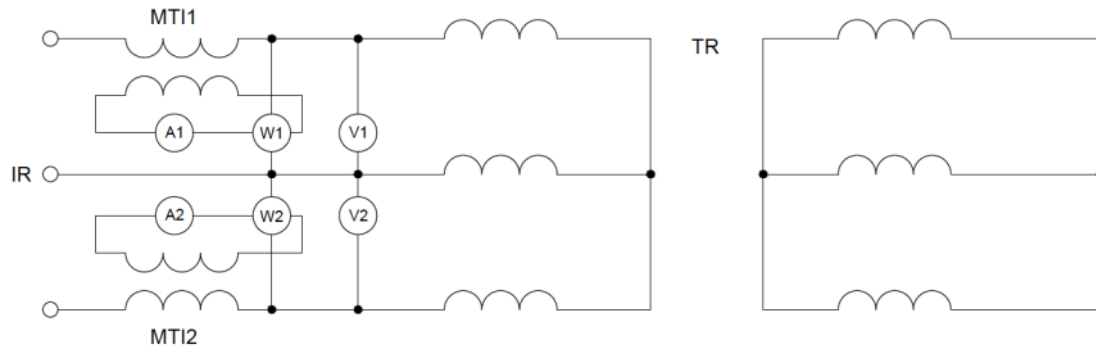
Pro oteplení transformátoru byla zvolena metoda napájení měřicího obvodu jmenovitým proudem transformátoru se spojením sekundárního vinutí nakrátko. Zapojení sekundárního vinutí je vidět na následujícím obrázku (Obr. 12).



Obr. 12 - spojení sekundárního vinutí nakrátko

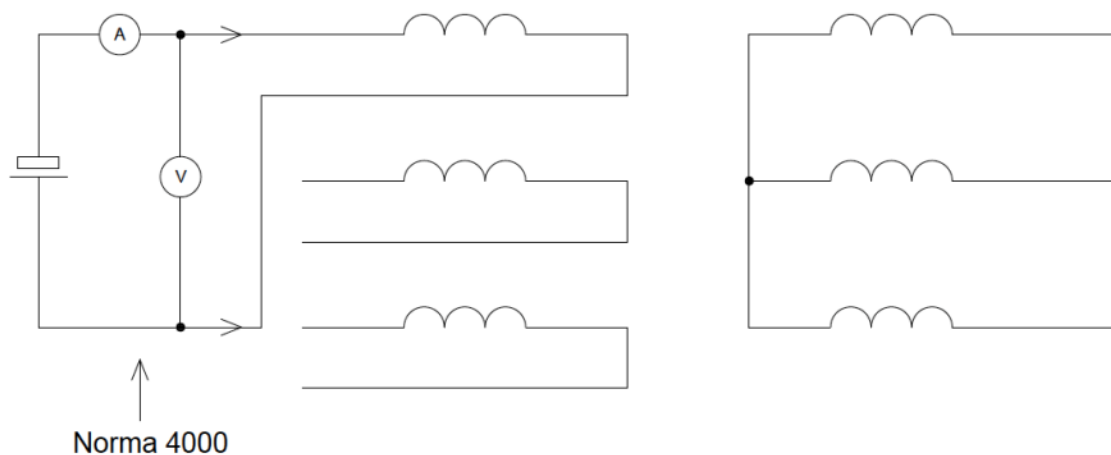
## 5.1 Schéma zapojení

Obvod byl napájen laboratorním indukčním regulátorem. Indukční regulátor dodával jmenovitý proud 5 A, dle výrobního štítku uvedeného v tabulce (Tab. 5). Z důvodu značného předdimenzování transformátoru nedocházelo při jmenovité hodnotě proudu k výraznějšímu oteplení aktivních částí. Z tohoto důvodu byla tato jmenovitá hodnota navýšena na dvojnásobek jmenovitého proudu na 10 A  $MTI_1$  a  $MTI_2$ . Díky zvýšenému proudu bylo dosaženo předpokládaného oteplení.



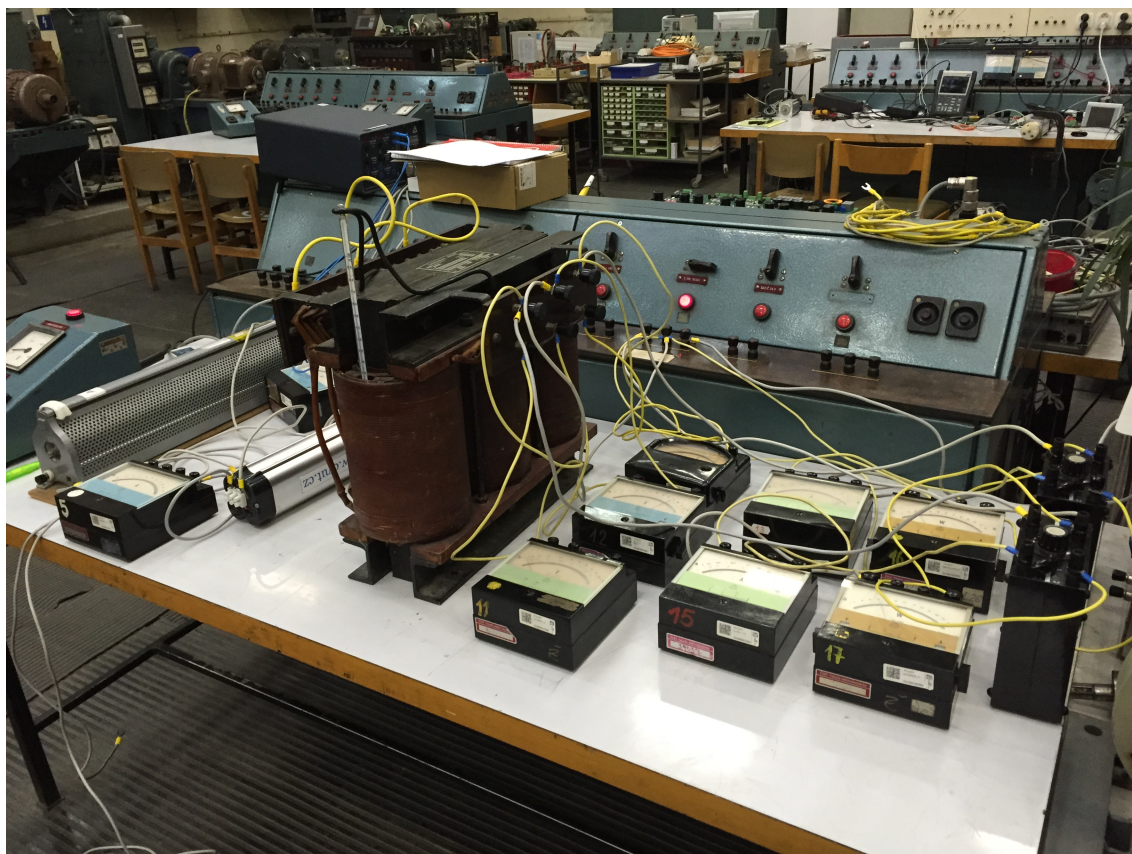
Obr. 13 - schéma zapojení při oteplování transformátoru

Po dosažení ustáleného teplotního stavu byl obvod na obrázku (Obr. 13) rozpojen a v co nejkratší době byl přepojen na obvod pro měření odporu jedné fáze. Obvod byl napájen stejnosměrným zdrojem. Nejprve byl použit laboratorní stejnosměrný budič 30 V, ale z důvodů uvedených v dalších kapitolách byl tento budič nahrazen akumulátorem, který dosahoval lepších výsledků. Měřicí schéma je zobrazeno na obrázku (Obr. 14).



Obr. 14 - schéma měření ochlazovací křivky transformátoru

Reálné zapojení v halové laboratoři H - 26 vypadalo následovně:



Obr. 15 – zapojení transformátoru

Na pravé straně od transformátoru se nacházejí voltmetry, ampérmetry a wattmetry pro 2 krajní fáze. V pozadí za transformátorem se nachází stejnosměrný měřicí obvod s akumulátorem a výkonovým analyzátořem Norma 4000 na vrchu ovládacího stolu.

## 6 Experimentální ověření navržené metodiky

### 6.1 Měření oteplovací křivky transformátoru

Údaje byly odečítány ručně. Pro účely ověřování zvolené metody bylo oteplování transformátoru považováno za ustálené, pokud teplota nestoupala za následujících 5 minut o více než jeden stupeň.

Vzhledem k tomu, že oteplování bylo vyhodnocováno z teploty v chladicím kanálu mezi primárním a sekundárním vinutím, byl pro měření teploty použit lihový teploměr, který není ovlivněn vířivými proudy, které by se v teploměru rtuťovém nebo v sondách typu PT100 mohly projevit. Chladicí kanál je místo, kde se nejvíce projeví účinky magnetického rozptylového toku.



Teplotní ustálení bylo pro zjednodušení posuzováno tímto způsobem, z důvodu omezení doby trvání zkoušky.

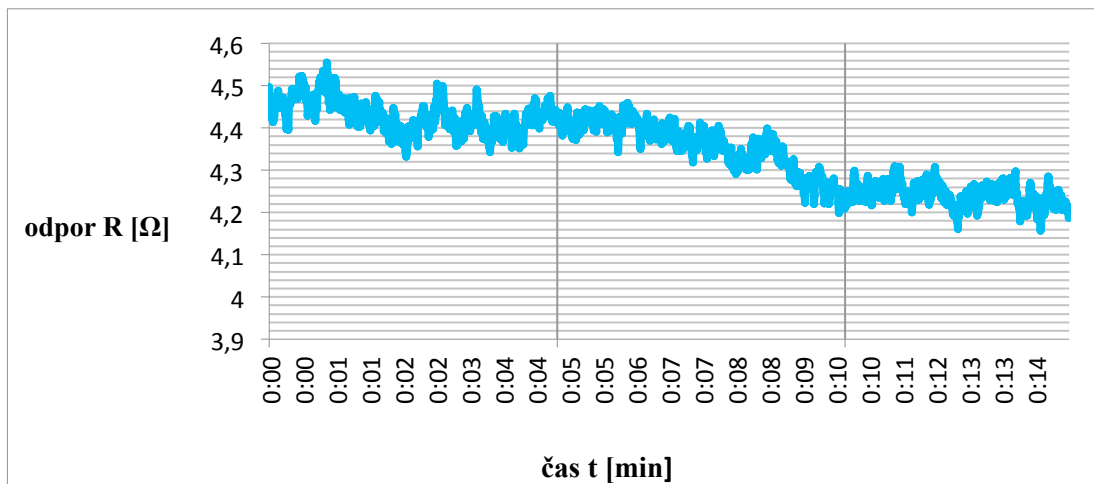


Obr. 16 - oteplovací křivka transformátoru

Po dosažení ustáleného oteplení byl odpojen střídavý zdroj napájení (laboratorní indukční regulátor), rozpojeno zkratované vinutí a připojen stejnosměrný zdroj s měřicím obvodem realizovaný výkonovým analyzátozem Norma 4000. Výkonový analyzátor byl ovládán z programu Microsoft Excel pomocí makra, které umožňovalo spojitý sběr naměřených údajů, tj. napětí a proudu.

## 6.2 Měření ochlazovací křivky transformátoru

Nejprve byl pro napájení stejnosměrného měřicího obvodu použit laboratorní stejnosměrný budič 30 V. Ale jak je vidět na následujícím obrázku (Obr. 17), je zřejmé, že rotační ústrojí tohoto budiče nedává vyhlazené napětí a výstup je silně zvlňný. Proto tento zdroj byl pro daný účel nepoužitelný. Hodnota napájecího stejnosměrného proudu se volí jako zhruba desetina jmenovitého proudu transformátoru. Proto byl stejnosměrný proud, napájecí měřicí stejnosměrný obvod veliký 0,5 A.



Obr. 17 - ochlazovací křivka při použití laboratorního stejnosměrného budiče 30 V

Z tohoto důvodu byl místo laboratorního stejnosměrného budiče obvod napájen akumulátorem, který vykazoval lepší průběhy napětí i proudu.

Vzhledem k tomu, že mezi odpojením střídavého zdroje a připojením stejnosměrného měřicího obvodu je značná časová prodleva, je třeba sejmutou ochlazovací křivku extrapolovat do času odpojení střídavého zdroje, viz kapitola 1.

Při ochlazování, respektive oteplování tělesa, je nutno vedle energie akumulované ve hmotě tělesa rovněž uvažovat teplo odváděné do okolí podle rovnice (analogie rovnice (16) z kapitoly 2.4.1):

$$Q = \Delta P_k \cdot dt = m \cdot c \cdot d\Delta\vartheta + S \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta \cdot dt \quad [s] \quad (60)$$

Z rovnice vyplývá, že ji lze aplikovat na homogenní soustavu, ze které se na ochlazování uplatňuje pouze proudění a nikoliv sálání. Jedná se o diferenciální rovnici prvního řádu s konstantními koeficienty. Její řešení je ve známém tvaru (analogie rovnice (24) z kapitoly 2.4.2):

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \Delta\vartheta_\infty(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (61)$$

Zjednodušeně můžeme uvažovat obě vinutí za samostatně ochlazovaná tělesa, která nejsou ovlivňována okolním prostředím (zejména magnetický obvod).

Časová konstanta jednotlivých vinutí potom je:

$$\tau_{vnitř} = \frac{m \cdot c}{S_{cív} \cdot \alpha} = \frac{1,43 \cdot 896}{0,14 \cdot 4} = 2288 \text{ s} = 38,13 \text{ min} \quad (62)$$

$$\tau_{vněj} = \frac{m \cdot c}{S_{cív} \cdot \alpha} = \frac{2,33 \cdot 896}{0,22 \cdot 5} = 1897,9 \text{ s} = 31,63 \text{ min} \quad (63)$$

kde  $c$  je měrné teplo pro hliník a které se rovná  $c = 896 \frac{J}{kg \cdot K}$

$m$  je hmotnost daného vinutí

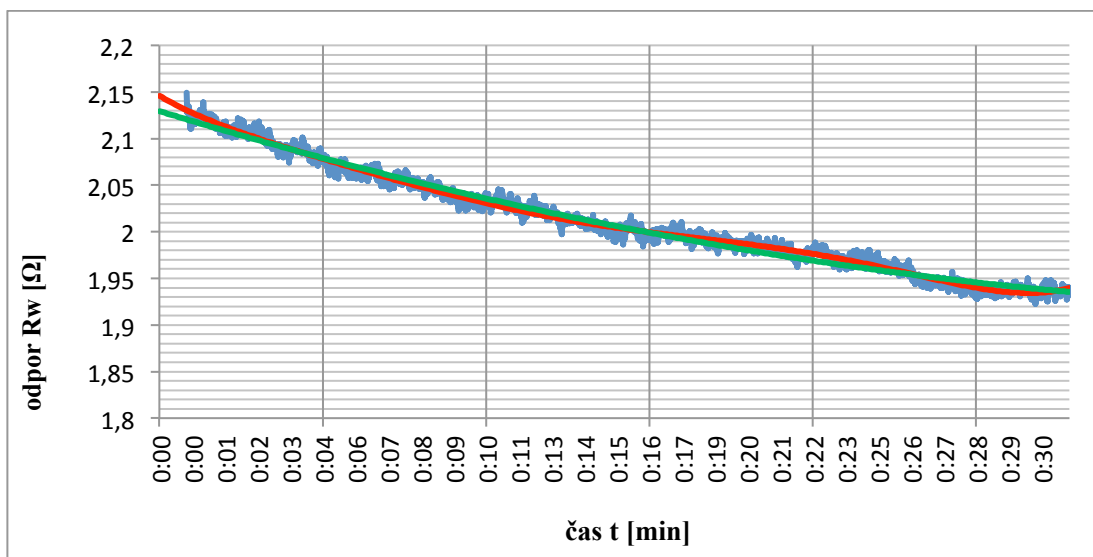
$S$  je povrch cívky

$\alpha$  je součinitel přestupu, který byl u vnější cívky sekundárního vinutí zvolen

vyšší z důvodu zakrytí chladících kanálů částmi spojek

Protože ochlazovanou soustavu (vinutí a magnetický obvod) nelze považovat za homogenní těleso, nemá ochlazovací křivka tvar exponenciály, který by měla mít, protože měření ochlazovací křivky trvalo pouze po dobu menší, než je tato časová konstanta, pro dosažení námi očekávaného průběhu ochlazování by bylo potřeba provádět měření po výrazně delší časový úsek. Takové měření použitý výkonový analyzátor ve spojení se školním počítačem neumožňoval. Důvodem bylo množství dat, které dokázalo ovládací makro výkonového analyzátoru zpracovat. Protože i po prodloužení kroku pro spojitě odečítání dat nashromáždilo makro za dobu měření 31 minut přes devět tisíc hodnot. Použitý školní měřicí počítač se zhruba při této hodnotě zasekl a více dat nepřijímal.

Na obrázku (Obr. 18) je vidět ochlazovací křivka při použití akumulátoru 30 V jako zdroje stejnosměrného napětí. Zde byla zvolena metoda extrapolace pomocí proložení ochlazovací křivky do okamžiku odpojení polynomicou spojnicí trendu druhého stupně (zelená) a šestého stupně (červená). Výsledná hodnota oteplení se určuje metodou extrapolace, abychom získali oteplení v době odpojení od napájení a přepojení na stejnosměrný zdroj. V této době dochází k nejvyššímu ochlazení, které kvůli nezbytné době na přepojení není možné změřit. Výsledný extrapolovaný odpor pomocí polynomu 6. stupně je  $2,146 \Omega$ , což odpovídá oteplení  $93,6^\circ\text{C}$  a pro polynom 2. stupně je odpor  $2,1295 \Omega$  a výsledné oteplení  $91,2^\circ\text{C}$ . Zde dochází k rozdílu 3,5% z celkové změny odporu/teploty.



**Obr. 18 - ochlazovací křivka transformátoru při napájení akumulátorem 30**

Hodnoty odporů jsou převzaty z předpisů rovnic pro polynom daného stupně vygenerovaných z grafu programem Microsoft Excel:

Regresní rovnice pro polynom 6. stupně:

$$R_w = 5E - 21t^6 - 4E - 17t^5 + 1E - 13t^4 - 2E - 10t^3 + 2E - 7t^2 - 0,0002t + 2,146 \quad (64)$$

Regresní rovnice pro polynom 2. stupně:

$$R_w = 1E - 8t^2 - 9E - 5t + 2,1295 \quad (65)$$

Výpočet výsledného oteplení dle vzorce z norem (viz kapitola 1, rovnice (4)):

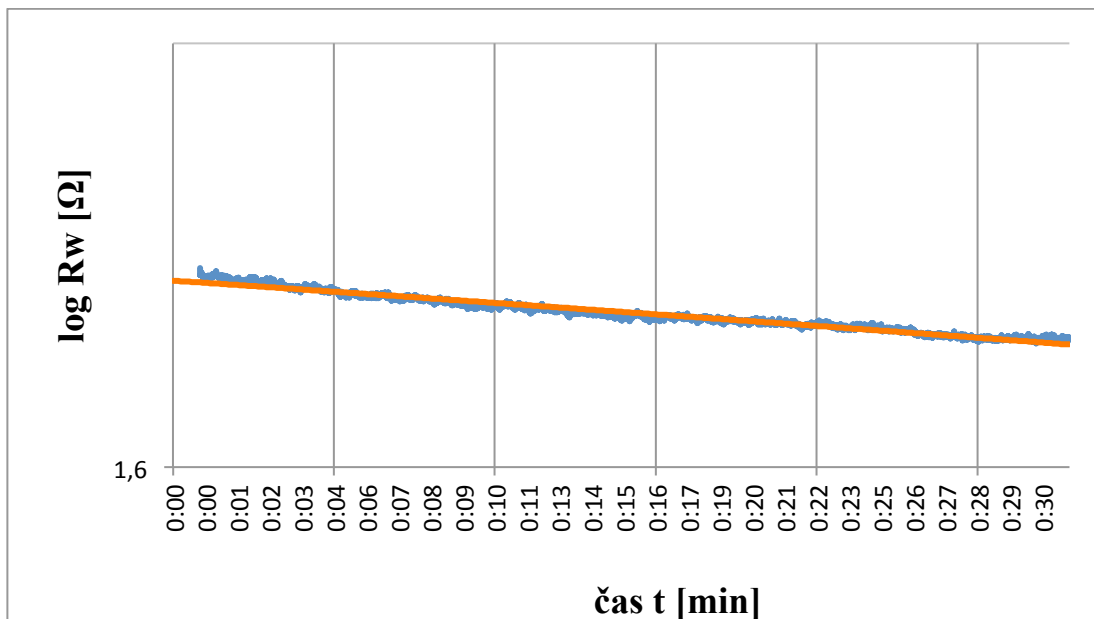
$$\vartheta_2 = \frac{R_2 \cdot (225 + \vartheta_1)}{R_1} - 225 \quad (66)$$

kde  $R_1$  je odpor při teplotě  $\vartheta_1$  a je roven  $R_1 = 1,65 \Omega$  a byl měřen při teplotě okolí, která byla  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\vartheta_{2(2,146)} = \frac{2,146 \cdot (225 + 20)}{1,65} - 225 = 93,648 \text{ }^\circ\text{C} \quad (67)$$

$$\vartheta_{2(2,1295)} = \frac{2,1295 \cdot (225 + 20)}{1,65} - 225 = 91,198 \text{ }^\circ\text{C} \quad (68)$$

Dále byla posuzována zjednodušená metoda extrapolace odporu, kdy bylo zvoleno logaritmické měřítko osy Y a lineární extrapolací byl určen maximální odpor 2,11  $\Omega$ . Tato metoda je znázorněna na obrázku (Obr. 19).



Obr. 19 - ochlazovací křivka s  $\log R_w$  a lineární spojnicí trendu

Regresní rovnice pro proloženou přímku:

$$R_w = -6E - 5t + 2,11 \quad (69)$$

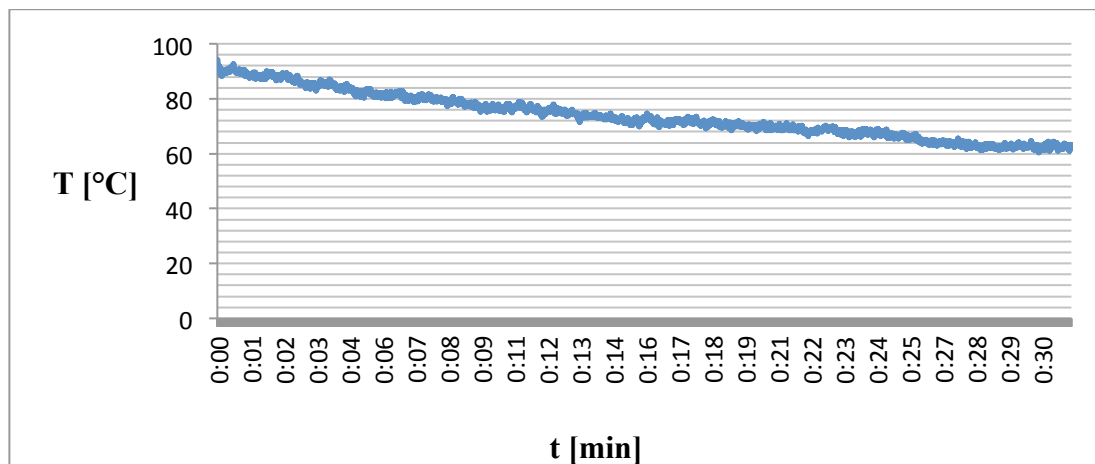
Výpočet výsledného oteplení:

$$\vartheta_{2(2,11)} = \frac{2,11 \cdot (225 + 20)}{1,65} - 225 = 88,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (70)$$

Je zřejmé, že na ochlazovacím procesu se podílí jednak vinutí a jednak magnetický obvod, přičemž magnetický obvod vzhledem ke své hmotnosti má vyšší časovou ochlazovací konstantu.

Pro účely ověření metody bylo ochlazování sledováno pouze na jedné fázi. Pro zvýšení spolehlivosti sejmutých dat by bylo vhodné realizovat měření i na ostatních dvou fázích, což použitá aparatura, tříkanálový výkonový analyzátor, umožňuje.

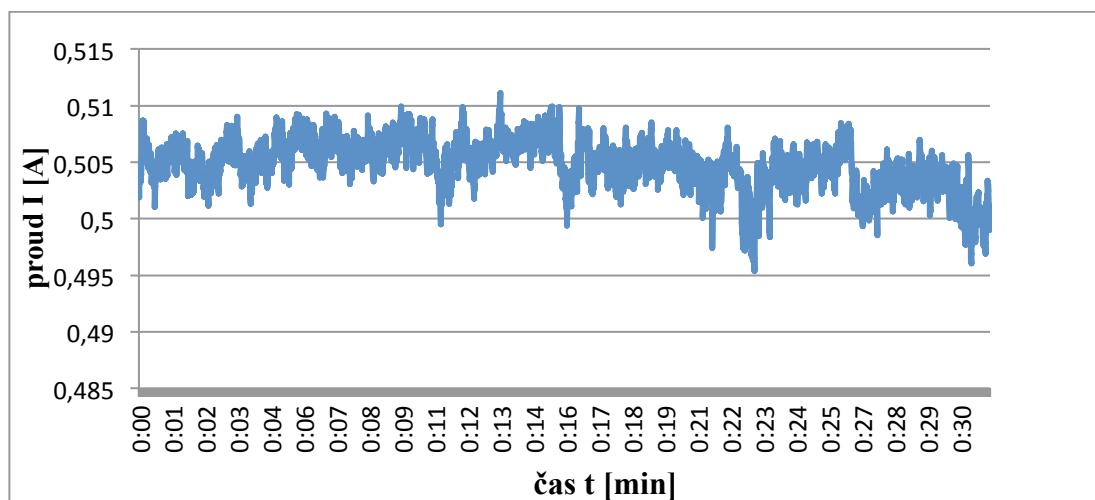
Na obrázku (Obr. 20) je vidět pokles teploty během chladnutí transformátoru ve sledovaném období.



Obr. 20 - pokles teploty po odpojení od střídavého napájení

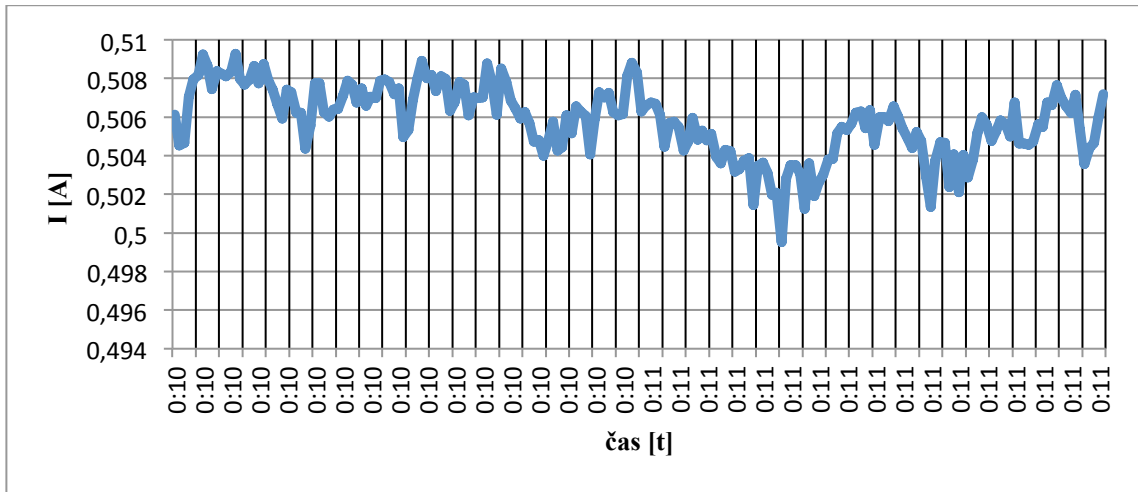
### 6.3 Analýza nepřesnosti měření

Nepřesnost měření je dokumentována vzorkem sejmutých dat viz obrázek (Obr. 21), na kterém je pro větší názornost potlačen počátek osy proudu. I přes použití akumulátoru, tj. tvrdého zdroje vyhlazeného stejnosměrného napětí, není výsledná ochlazovací křivka stále spojitá. To mohlo být způsobeno například přetečením rozsahu nebo jiné chybě dané nepřesností během odečtu. Na obrázku je vidět sejmутý průběh proudu během měření ochlazovací křivky. Je zřejmé, že pro daný případ je třeba měřit obě hodnoty napětí a proudu se současným odečtem. Pokud by byl k dispozici zdroj, který by dodával konstantní hodnotu proudu, měřila by se pouze hodnota napětí a chyba v měření by se tím zmenšila.



Obr. 21 - průběh proudu během měření ochlazovací křivky

Na obrázku (Obr. 22) je pro větší názornost průběh proudu zobrazen během kratšího časového úseku 10. – 11. minuta.



Obr. 22 – průběh proudu stejnosměrného měřicího obvodu v 10. – 11. Minutě

Dochází k rozptylu od minimální hodnoty proudu – 0,49536A po maximální hodnotu – 0,51111A. Střední hodnota proudu je 0,504821A, rozptyl tedy činí  $\pm 0,007875A$  od střední hodnoty.

## 7 Použité přístroje

### Norma 4000

Ke spojitému záznamu hodnot byl použit výkonový analyzátor Norma 4000, viz (Obr. 23) [12]. Jedná se o tříkanálový přístroj, který tedy umožňuje snímání hodnot proudu a napětí na třech různých fázích.



Obr. 23 - výkonový analyzátor Norma 4000

Jedná se o přístroj, který pomáhá konstrukčním technikům během vývoje elektronických zařízení např.: převodníků, transformátorů, automobilových součástí, osvětlení, dají se s ním testovat motory nebo dodávky energie. [9]

Mezi funkce tohoto přístroje patří vysoce přesné měření proudu a napětí na jednofázových nebo třífázových systémech, analýza harmonických a také Fourierova transformační analýza. Na displeji se dále zobrazují další odvozené hodnoty, jako je například výpočet výkonu. [9]

Na přední straně přístroje se nachází veliký displej, kde jsou zobrazovány měřené a dopočítané hodnoty. V levé části displeje se nachází sloupek, ve kterém se pro každý kanál zobrazuje vybraný rozsah, AC/DC vazba a proužek odezvy. Na zbylém prostoru displeje jsou většími znaky zobrazeny příslušné hodnoty veličin pouze pro jeden zvolený kanál. Vedle displeje na pravé straně se nachází ovládací rozhraní skládající se ze dvou sekcí tlačítek. Horní skupina tlačítek se používá pro konfiguraci a dolní skupina pro měření, kde je možné spustit a zastavit trvalé měření, tisk obrazovky nebo paměťové funkce pro měřené hodnoty.

V příloze 11.2 [10], je vidět zadní strana výkonového analyzátoru a způsob připojování měřících kanálů.

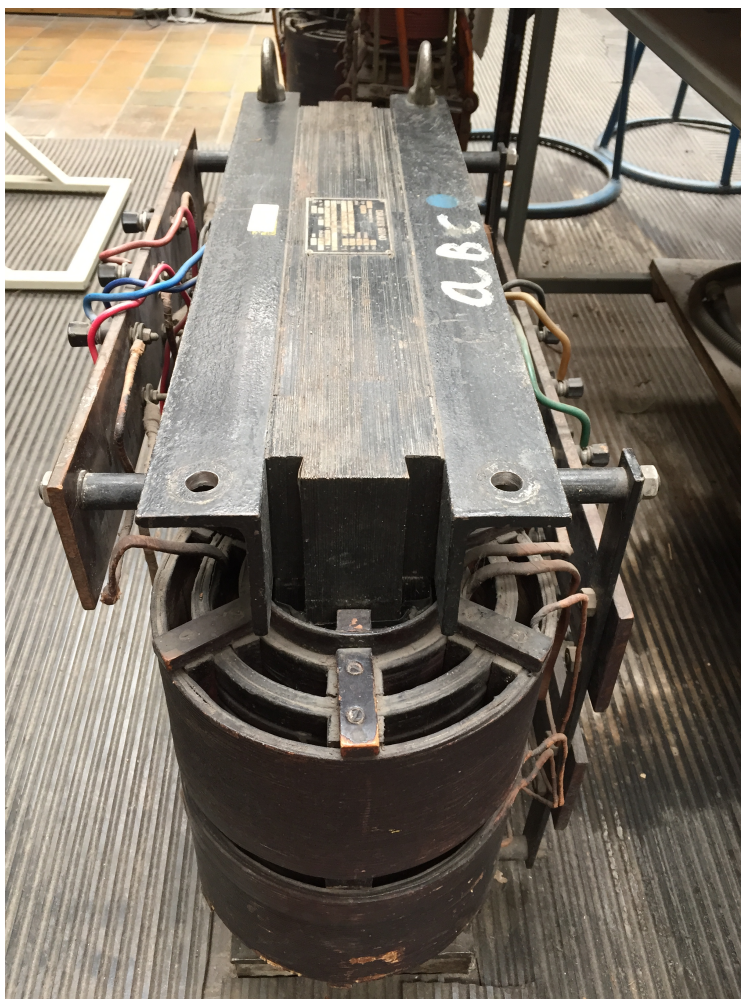
Napěťový a proudový vstup byl pro měření ochlazovací křivky zapojen dle obrázku (Obr. 14). Snímaná data byla kontinuálně ukládána prostřednictvím makra v programu Microsoft Excel a jsou uvedena na příloženém CD jako příloha. Četnost snímání byla nastavena na 0,1 s, což se pro daný případ neukázalo jako optimální. Z časových důvodů, vzhledem k tomu, že proces oteplování na ustálenou teplotu a následné ochlazování zabíralo cca. 8 hodin, nebylo další měření s vhodněji nastavenou dobou odečtu realizováno. Analýzou sejmutých dat se jeví jako vhodnější nastavit četnost odečtu zhruba 30 s rovněž z toho důvodu, že maximální rozsah snímaných dat je nastaven na cca 30 tisíc hodnot.



## 8 Porovnání transformátorů 3,3kVA a 20kVA

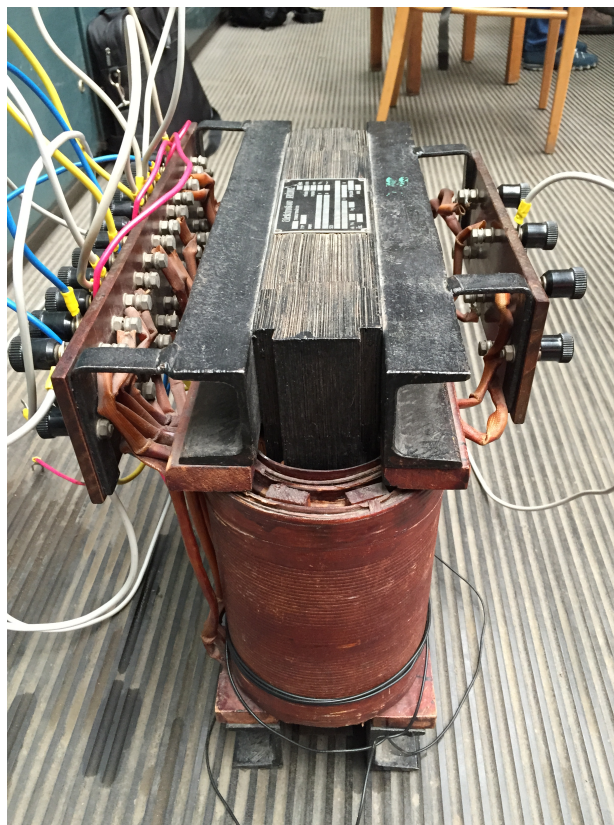
Z rozhodnutí vedoucího práce a na základě nepřesnosti sejmutých dat jsem se dále zaměřil na vzduchový transformátor 20kVA na stacionárním stanovišti v halové laboratoři 26, jehož magnetický obvod a zejména vinutí jsou z hlediska definování chladících obvodů daleko lépe popsitelné. Obrázky (Obr. 25) – (Obr. 28) dokumentují výše uvedené důvody. Lze však očekávat, že vzhledem k podstatně většímu výkonu budou časové konstanty výrazně vyšší, což povede k výrazně vyšší časové náročnosti na provedení měřících zkoušek.

Na obrázku Obr. 25 jsou z bočního pohledu vidět odkryté chladící kanály transformátoru 20kVA. Chladící kanály nejsou zakryté spojkami a umožňují lepší cirkulaci vzduchu a tím lepší chlazení.



Obr. 24 – transformátor 20kVA z bočního pohledu

Za to na obrázku (Obr. 26) jsou vidět zakryté chladící kanály transformátoru 3,3kVA částmi spojek, které brání účinné cirkulaci vzduchu.



Obr. 25 – boční pohled na transformátor 3,3kVA

To samé dokumentují i následující dva obrázky při pohledu zředu.



Obr. 26 – transformátor 20kVA



Obr. 27 – transformátor 3,3kVA

## 9 Závěr

V této bakalářské práci je proveden výpočet oteplení třífázového suchého transformátoru a popsáno jeho experimentální ověření v laboratoři H26 katedry na transformátoru 3,3kVA. Na základě studia příslušných technických norem a způsobů metodik výpočtů byla provedena samotná zkouška. Bylo naměřeno velké množství dat, která byla následně zpracována jak do grafické, tak i číselné podoby. Zkouška byla provedena v náhradním zapojení nakrátko – bylo zkratováno sekundární vinutí. Po dosažení ustáleného oteplení byl transformátor odpojen od střídavého zdroje a zvolené vinutí bylo napájeno z olověného akumulátoru. Ochlazovací křivka představovaná poklesem vypočteného stejnosměrného odporu, byla zaznamenána výkonovým analyzátozem Norma 4000, který umožnil přesné a rychlé měření potřebných veličin. Vzhledem k potřebě současného odečtu hodnot napětí a proudu by měření se zvolenou četností odečtů 0,1 s bez výkonového analyzátoru nebylo možné realizovat. Naměřená ochlazovací křivka byla extrapolována do času odpojení střídavého napájení, které bylo použito během oteplování transformátoru. Z takto zjištěného odporu vinutí bylo vyhodnoceno jeho výsledné oteplení. Pro ověření shody měření a výpočtu nebyl použitý transformátor zcela ideální, a to z důvodu těžko definované geometrie chladičského obvodu. Chladičí kanály jsou u střední fáze zakryté úplně a na krajních fázích zhruba z poloviny. Nelze tedy přesně stanovit teplosměnné plochy. Proto není chlazení transformátoru ideální a mohlo zanést určitou chybu do výpočtu. Tento problém je podrobně zdokumentován v kapitole 8.

V laboratoři jsou k dispozici stacionární transformátory 20kVA, které tento nedostatek nemají, lze však očekávat, že doba trvání oteplovací zkoušky, která v daném případě činila cca. 8 hodin, by výrazně narostla.

Všechny cíle práce byly dosaženy, v úvodních kapitolách jsou uvedeny metodiky provádění tepelných zkoušek, v kapitole 5 je uveden elektromagnetický a tepelný přepočít laboratorního transformátoru a v následující kapitole je proveden návrh pracoviště s výsledky z měření oteplovací zkoušky spolu s analýzou nashromážděných dat.

## 10 Seznam literatury

- [1] Cigánek, Ladislav. *Stavba Elektrických Strojů* Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958
- [2] Jarošek, Jozef, and Rudolf Plencner. *Transformátory* Vyd. 1. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1961
- [3] Gotter, Gottfried. *Erwärmung Und Kühlung Elektrischer Maschinen* Berlin: Springer-Verlag, 1954
- [4] Ing. Buhr Karel, CSc., Prof. Ing. Bouda Václav, CSc. – Studie úprav stykových transformátorů, 2008
- [5] Ing. Buhr Karel, CSc. – Elektromagnetický návrh transformátoru v prostředí MS Excel, 2005
- [6] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) [2015]
- [7] ČSN EN 60076-2 Výkonové transformátory – Část 2: Oteplení
- [8] ČSN 35 1002 Výkonové transformátory: Metody oteplovacích zkoušek
- [9] <http://www.fluke.com/fluke/czcs/pomucky-pro-kvalitu-site/fluke-norma-4000-5000.htm?pid=56163> (stránky výrobce výkonového analyzátoru Norma 4000) [2015]
- [10] Návod k použití výkonového analyzátoru Norma 4000
- [11] Chen Yicheng. *An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitacion*, Clarkson University NY, USA, 2002
- [12] [http://www.mtk-messtechnik.de/media/img/device/lem\\_d4000.jpg](http://www.mtk-messtechnik.de/media/img/device/lem_d4000.jpg) [2015]
- [13] Kopylov, Igor Petrovič. *Stavba Elektrických Strojů* 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1988
- [14] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/554-vznik-mezni-vrstvy-tekutiny> [2015]
- [15] Crepaz, Sergio. *Eddy – Current Losses in Rectifier Transformers*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas – 89, No. 7, 1970
- [16] Hapl, Josef, and Karel Nosek. *Stavba Transformátorů* 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1971

## 11 Přílohy

### 11.1 Tabulka hodnot pro určení součinitele přestupu $\alpha$ [4]

			vzduch				
c	měrné teplo	Ws/K/m <sup>3</sup>	1200	1200	1200	1200	1200
$\beta$	objemová roztažnost		0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033
$\lambda$	tepelná vodivost	W/K/m	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
v	kinematická viskozita	m <sup>2</sup> /s	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002
$\Delta\theta$	oteplení	K	0	2	4	6	8
h	svislá výška stěny	m	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
$\alpha$	součinitel přestupu	W/m <sup>2</sup> /K	0,000	2,480	2,950	3,264	3,508
			vzduch				
			1200	1200	1200	1200	1200
			0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033
			0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
			0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002
			10	12	14	16	18
			20	30	40		
			0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
			3,709	3,882	4,035	4,172	4,296
			4,411	4,882	5,246		
			vzduch				
			1200	1200	1200	1200	1200
			0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033
			0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
			0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002
			50	60	70	80	90
			100	110	120		
			0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
			5,546	5,805	6,033	6,238	6,424
			6,596	6,755	6,903		
			vzduch				
			1200	1200	1200	1200	1200
			0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033
			0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
			0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002
			130	140	150	160	170
			180	190	200		
			0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
			7,043	7,175	7,300	7,418	7,532
			7,640	7,744	7,844		

## 11.2 Zadní strana výkonového analyzátoru [10]

Pohled na přístroj zezadu:

