

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Experimentální sestava pro studium tepelného namáhání izolace
vinutí

Autor práce:

Bc. Marek Liška

Vedoucí práce:

Ing. Petr Martínek Ph.D.

2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek LIŠKA**
Osobní číslo: **E21N0009P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Experimentální sestava pro studium tepelného namáhání izolace vinutí**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Návrh a realizace testovacího obvodu pro silnoproudé (50 Hz) generování zkušebního proudu pomocí proudového transformátoru.
2. Měření kalibračních křivek ($I_{out} = f(U_{inp})$) při různé zátěži zkušebního obvodu.
3. Realizace tepelného měření termočlánky.
4. Záznam a zpracování naměřených dat.
5. Měření na jednoduchém vzorku (modelu) vinutí.

Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. Materiály z přednášek Prof. Kožený/ Doc. Rot týkající se tématu měření oteplení.
2. Základní elektrotechnické publikace týkající se termočlánků a proudových transformátorů.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Martínek, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**




L.S.
Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan


Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval/a samostatně a všechny použité prameny jsem uvedl/a v seznamu použitých zdrojů.

V Plzni dne 24.05.2024.

.....

vlastnoruční podpis

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou ohřevu závitu vinutí asynchronního motoru a degradace jeho izolace při překročení povolené teploty. Práce zkoumá teoretické aspekty přenosu tepla a aplikuje je na praktické příklady ohřevu závitů elektrických strojů. Hlavním aspektem práce je poté tvorba měřicího zařízení a samotné měření oteplení vzorku, kterým je závit asynchronního motoru. Poslední kapitoly detailně popisují výsledky měření oteplení vzorku procházeného elektrickým proudem a jejich zpracování. Měření bylo prováděno při různých hodnotách primárního proudu a teplota byla vzorkována každých 250 ms, což umožnilo detailní sledování teplotních změn a analýzu ustáleného teplotního stavu. Z výsledků je patrné, že opravdu došlo k potvrzení původního předpokladu, tedy dochází k většímu oteplení ohybů než částí rovných. Rozdíl mezi oteplením zahnutých částí oproti částem rovným byl téměř 14 °C, a to konkrétně při měření, kdy sekundární částí obvodu protékal proud 1056,5 A. Nabízí se tedy myšlenka, že může izolace degradovat více v ohybech, neboť v nich dochází k většímu oteplení při průchodu elektrickým proudem.

Klíčová slova

Asynchronní motor, ohřev vinutí, tepelné ztráty, izolační materiály, měření teploty, analýza dat, Labview, teplotní senzor, ustálený teplotní stav, tepelná vodivost, osciloskop, časová konstanta, teplotní charakteristiky, degradační procesy.

Abstract

This thesis addresses the issue of heating the winding turns of an asynchronous motor and the degradation of its insulation when the permissible temperature is exceeded. The work examines the theoretical aspects of heat transfer and applies them to practical examples of heating in electric machine windings. The main focus of the thesis is the development of a measuring device and the actual measurement of the temperature increase in a sample, specifically a winding turns of an asynchronous motor. The final chapters provide a detailed description of the temperature measurement results of the sample through which electric current was passed and their processing. The measurements were conducted at various values of primary current, and the temperature was sampled every 250 ms, allowing for detailed monitoring of temperature changes and analysis of the steady-state temperature condition. The results clearly confirm the original hypothesis, indicating that there is indeed greater heating of the bends than the straight sections. The difference in temperature rise between the bent sections and the straight sections was almost 14 °C, specifically in measurements where a current of 1056.5 A flowed through the secondary part of the circuit. This suggests that the insulation may degrade more in the bends, as they experience greater heating when electric current passes through them.

Key Words

Asynchronous motor, winding heating, thermal losses, insulation materials, temperature measurement, data analysis, Labview, temperature sensor, steady-state temperature, thermal conductivity, oscilloscope, time constant, temperature characteristics, degradation processes.

Poděkování

Nejprve bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce, panu Ing. Petru Martínkovi, za jeho neocenitelné vedení, odborné rady a podporu během celého výzkumu. Jeho znalosti a podněty byly pro mě neocenitelné a tvořily velkou inspiraci.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za jejich trpělivost, a neustálou podporu během mého studia.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Vznik tepla v elektrických systémech	- 2 -
1.1 Vznik tepla vlivem procházejícího proudu.....	- 2 -
1.2 Vliv frekvence na oteplení vodiče (Skin efekt).....	- 3 -
1.3 Tepelná rovnováha vodiče.....	- 5 -
1.3.1 Oteplení vodiče o odporu R protékaného konstantním proudem I	- 5 -
1.3.2 Teplotně ustálený stav	- 8 -
1.3.3 Možné modifikace výpočtu	- 8 -
1.3.4 Výpočet oteplení izolovaného vodiče.....	- 8 -
2 Elektrické točivé stroje a jejich izolace	- 11 -
2.1 Elektrické točivé stroje	- 11 -
2.1.1 Princip.....	- 11 -
2.1.2 Asynchronní točivé stroje.....	- 13 -
2.2 Materiály využívané pro stavbu elektrického stroje.....	- 13 -
2.2.1 Elektricky vodivé materiály.....	- 14 -
2.2.2 Magneticky vodivé materiály	- 14 -
2.2.3 Izolační materiály	- 16 -
2.3 Vinutí elektrických točivých strojů	- 19 -
2.3.1 Nároky kladené na vinutí.....	- 19 -
2.3.2 Funkce vinutí v elektrických strojích	- 19 -
2.3.3 Konstrukce vinutí elektrických strojů	- 20 -
2.3.4 Druhy střídavých vinutí z hlediska konstrukce	- 21 -
2.3.5 Druhy drážek	- 23 -
2.4 Chlazení elektrických strojů	- 23 -
2.4.1 Konkrétní druhy chlazení	- 24 -
3 Elektrické netočivé stroje – proudový transformátor	- 25 -
3.1 Transformátory vinutého typu	- 26 -
3.2 Transformátory tyčového typu	- 27 -
3.3 Převod proudového transformátoru	- 27 -

4	Měření teploty	- 28 -
4.1	Dilatační teploměry	- 29 -
4.1.1	Plynové teploměry	- 29 -
4.1.2	Teploměry kapalinové	- 29 -
4.1.3	Dilatační kovové teploměry	- 29 -
4.2	Elektrické teploměry.....	- 30 -
4.2.1	Termoelektrické články	- 30 -
4.2.2	Odporové kovové teploměry	- 32 -
4.2.3	Polovodičové odporové teploměry	- 33 -
4.3	Bezdotykové měření teploty	- 34 -
4.3.1	Termovizní systémy	- 34 -
5	Návrh a realizace testovacího obvodu pro silnoproudé generování zkušebního proudu pomocí proudového transformátoru.	- 35 -
5.1	Měřicí sestava pro tvorbu kalibračních křivek	- 35 -
5.1.1	Schéma zapojení měřicí sestavy pro tvorbu kalibračních křivek	- 35 -
5.1.2	Použité přístroje pro měření kalibračních křivek	- 36 -
5.1.3	Tvorba kalibrační křivky	- 36 -
5.1.4	Postup měření kalibračních křivek	- 37 -
5.1.5	Dokumentace měření kalibračních křivek.....	- 38 -
5.1.6	Naměřené hodnoty kalibračních křivek.....	- 39 -
5.1.7	Kalibrační křivky	- 40 -
5.2	Měření oteplení na vzorku (modelu) vinutí.....	- 42 -
5.2.1	Měřicí sestava pro měření teploty modelu vinutí.....	- 42 -
5.2.2	Software a hardware použitý pro měření teploty.....	- 43 -
5.2.3	Příprava měřeného vzorku vinutí	- 45 -
5.2.4	Postup měření a dokumentace měřicí sestavy	- 47 -
6	Teplotní průběhy měřeného vzorku.....	- 50 -
6.1	První měření $I_s = 502,5$ A	- 51 -
6.2	Druhé měření $I_s = 641,5$ A	- 53 -
6.3	Třetí měření $I_s = 835$ A	- 55 -
6.4	Čtvrté měření $I_s = 1056,5$ A	- 57 -

6.5	Paté měření $I_s = 1342 \text{ A}$	- 59 -
	Diskuse výsledků měření teploty vzorku.....	- 61 -
	Závěr.....	- 63 -
	Bibliografie.....	- 67 -

Seznam symbolů a zkratk

I	[A] - Elektrický proud
W_e	[J] - Energie elektrického pole
Q	[C] - Elektrický náboj
U	[V] - Elektrické napětí
R	[Ω] - Elektrický odpor
ω	[$rad \cdot s^{-1}$] – Úhlový kmitočet proudu
μ	[H/m] – Permeabilita prostředí
γ	[S/m] – měrná elektrická vodivost
a	[-] - Hloubka vniku
α_0	[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] – Součinitel přestupu tepla
A	[m^2] – Ochlazovací povrch
$\Delta\theta$	[K] – Okamžité oteplení tělesa proti okolí
c	[$J/m^3 \cdot K$] – Objemová tepelná kapacita
V	[m^3] – Objem
S	[%] – Skluz
n_s	[ot/min] – Synchronní otáčky
n	[ot/min] – Otáčky rotoru
$tg\delta$	[-] – Ztrátový činitel
$C_{S(P)}$	[F] – Kapacita kondenzátoru
p	[Pa] – Tlak plynu
n	[mol] – Látkové množství
R	[$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$] – Molární plynová konstanta
T	[K] – Termodynamická teplota

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou tepelného namáhání izolace vinutí asynchronního motoru, což je důležitý aspekt pro spolehlivost a dlouhodobou životnost elektrických strojů. Tepelné namáhání může vést k degradaci izolačních materiálů, což následně ovlivňuje funkčnost a bezpečnost stroje. Vzhledem k tomu, že asynchronní motory jsou široce využívány v různých průmyslových aplikacích, je zkoumání jejich tepelných vlastností a chování izolace klíčové pro optimalizaci jejich provozu a údržby.

Cílem této práce je provést experimentální měření oteplení vzorku vinutí asynchronního motoru při různých hodnotách primárního proudu a analyzovat rozdíly v oteplení mezi rovnými částmi a ohyby vinutí. Zvláštní pozornost je věnována teplotě 200 °C, která je výrobcem definována jako mezní teplota, při které by izolace neměla vykazovat urychlenou degradaci.

V prvních kapitolách jsou rozebírány teoretické aspekty vzniku tepla v elektrických systémech, vliv procházejícího proudu a frekvence na oteplení vodiče a principy tepelné rovnováhy. Dále práce popisuje základy elektrických točivých i netočivých strojů, neboť jsou tyto informace nutné pro správné chápání celé práce. Následující kapitoly se zaměřují na experimentální metody měření teploty a analýzu dat, včetně vytvoření kalibračních křivek pro přesný odhad potřebného primárního proudu k dosažení určité ustálené teploty vzorku.

Práce využívá moderní metody a nástroje, jako je analýza dat pomocí softwaru LabVIEW, teplotní senzory pro detailní monitorování teplotních změn a osciloskop pro měření elektrických veličin. Tyto nástroje umožňují získat přesná a detailní data, která jsou nezbytná pro vyhodnocení tepelného namáhání a stanovení kritických míst ve vinutí motoru.

V závěrečné části práce jsou prezentovány výsledky měření, které potvrzují původní hypotézu o větším oteplení ohybů vinutí oproti rovným částem. Tento rozdíl v oteplení je důležitým faktorem, který je třeba zohlednit při návrhu a konstrukci vinutí motorů, aby byla zajištěna jejich optimální funkčnost a dlouhá životnost.

Celkově tato diplomová práce přináší nové poznatky do oblasti tepelného namáhání izolace vinutí asynchronních motorů a poskytuje praktické doporučení pro jejich konstrukci a provoz. Výsledky mohou být využity jak v dalším výzkumu, tak v průmyslové praxi, což podtrhuje význam tohoto výzkumu pro vývoj nových technologií v oblasti elektrických strojů.

1 Vznik tepla v elektrických systémech

Pro dostatečné porozumění předkládané diplomové práce, je třeba si nejprve ujasnit několik základních fyzikálních principů, se kterými se právě v této práci setkáme. Obecně se zde pojednává o fyzikálních principech vzniku tepla ve vodičích, jež jsou procházeny elektrickým proudem I , způsoby měření tepla nebo princip a funkce některých použitých přístrojů.

1.1 Vznik tepla vlivem procházejícího proudu

Během změn elektromagnetického pole dochází v látkách k pohybům částic, které nesou elektrický náboj. Dochází k předávání části kinetické energie částic do okolí, kde dochází k interakci částic s atomy prostředí a dále v pevných látkách s atomy krystalické mřížky. Teplota látky se tím zvyšuje. (1)

Průchodem elektrického proudu $i(t)$ vodičem dochází k vykonávání práce sil elektrického pole, která je vypočtena pomocí následujícího vztahu:

$$W = \int_A^B Q_0 E \cdot dr = Q_0 \cdot U_{AB} [J] \quad (1.1)$$

Když se za čas dt průřezem vodiče pohybuje náboj $i(t)dt$, práce dW sil elektrického pole je dána vztahem:

$$dW = u \cdot i \cdot dt \quad (1.2)$$

- kde u představuje rozdíl potenciálů (napětí) na vodiči

Tato práce je následně přeměněna na teplo dQ , které je odpovědné za ohřátí vodiče protékajícího elektrickým proudem $i(t)$. Toto teplo je následně odvedeno do okolí.

Celkové teplo uvolněné při průběhu proudu $i(t)=I$ vodičem se známým odporem R v časovém intervalu (t_1, t_2) lze získat integrací:

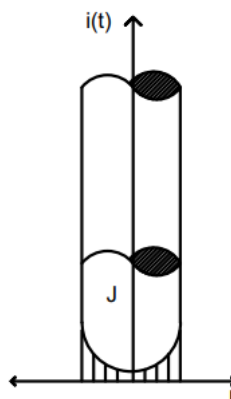
$$Q = \int_{t_1}^{t_2} u(t) \cdot i(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} R \cdot i^2(t) \cdot dt = R \cdot I^2 \Delta t [J] \quad (1.3)$$

Tento vztah je známý jako Joulov zákon a platí i pro časově proměnné proudy $i(t)$. Výkon elektrického pole při průchodu proudu I mezi dvěma body s potenciálním rozdílem U , tedy elektrický výkon spotřebovaný na odporu vodiče R (tzn. Joulovy ztráty), lze vyjádřit jako:

$$P = \frac{dW}{dt} = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1.4) \quad (1)$$

1.2 Vliv frekvence na oteplení vodiče (Skin efekt)

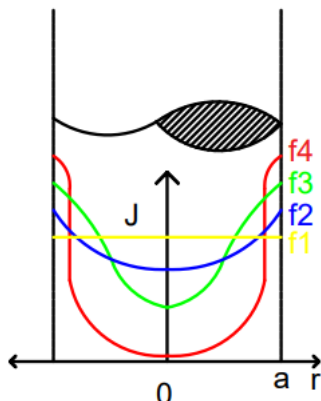
Dalším faktorem, jež ovlivňuje oteplení vodiče je velikost frekvence protékajícího proudu $i(t)$. Ta totiž ovlivňuje rozložení proudové hustoty ve vodiči a pokud je procházející proud proměnný, dojde k tomu, že je právě tato proudová hustota rozložena nerovnoměrně viz obr 1.1. S rostoucí hloubkou pod povrchem vodiče se proudová hustota snižuje a dochází k jejímu časovému posuvu.



Obrázek 1.1: Vliv skin efektu na rozložení proudové hustoty (2)

Pokud by proud nebyl časově proměnný, proudová hustota by se rozložila rovnoměrně. S nárůstem rychlosti změn proudu roste i význam povrchového jevu. Dopad skin efektu je rostoucí s frekvencí procházejícího proudu. Při vysokých kmitočtech se proud koncentruje do tenké povrchové vrstvy, což má za následek zvýšení odporu vodiče. Důvodem zvýšení odporu je fakt, že tok proudu válcovým vodičem, o frekvenci f , vede ke vzniku skin efektu, který vytlačuje tok proudu směrem na povrch vodiče, vodič se tedy chová jako „dutý“ a nevyužívá k toku proudu celý svůj průřez, což vede na zvýšení ztrát a vznik ztrátového tepla.

Uvažujeme-li již výše zmíněný vodič kruhového průřezu, kterým protéká časově proměnný proud, zjistíme, že vnitřní magnetické pole indukované proudovou hustotou vyvolává elektromotorickou sílu podle Faradayova zákona. Tato síla působí proti změnám proudu, což má za následek nerovnoměrné rozložení proudové hustoty ve vodiči. Takto indukovaný proud má proto ve vnitřních vrstvách směr, který působí proti proudu protékajícímu vodičem, a v povrchových vrstvách směr s tímto proudem shodný.



Obrázek 1.2: Hloubka vniku pro jednotlivé frekvence (2)

Jak bylo naznačeno, skin efekt zvyšuje odpor vodiče a tento zvýšený odpor se nazývá efektivní odpor. Je ovšem nežádoucí, neboť nám zvyšuje Jouleovy ztráty, což vede na zvýšení oteplení vodiče a na snížení celkové účinnosti přenosu elektrické energie. Skin efekt je charakterizován hloubkou vniku, která určuje vzdálenost od povrchu vodiče, kde zaznamenanáme pokles proudové hustoty J na hodnotu $J = J_0 \cdot e^{-1}$ tedy na 36,8 %.

V případě že je průměr vodiče dostatečně větší než hloubka vniku, je proudová hustota ve vodiči rozložena rovnoměrně a nebude docházet ke vzniku skin efektu. Hloubka vniku se určí takto:

$$a = \frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma} \quad (1.5)$$

Kde:

- ω – úhlový kmitočet proudu
- μ – permeabilita prostředí
- γ – měrná elektrická vodivost

Tabulka 1.1: Hloubka vniku pro různé materiály při různé frekvenci

Frekvence f	Hloubka vniku δ [mm]		
	Měď	Hliník	Železo
100 Hz	6,6	8,5	0,66
1 kHz	2,1	2,7	0,02
10 kHz	0,66	0,84	0,08
100 kHz	0,2	0,3	0,02
1 MHz	0,08	0,08	0,008

Jak je patrné z tabulky 1.1, hloubka vniku je díky měrné elektrické vodivosti závislá na vlastnostech materiálu, a proto se u daných materiálů liší. Také je ovšem závislá na úhlové rychlosti, a proto se její hodnota mění s frekvencí. Běžně se v elektrotechnice používá měděných vodičů a síť generuje napětí o frekvenci 50 Hz, pro tyto hodnoty je odpovídající hloubka vniku přibližně 10 mm. V kapitole elektrických strojů a pohonů se ale běžně setkáme i s frekvencemi vyššími a hodnota hloubky vniku vlivem toho klesá. (2) (3)

1.3 Tepelná rovnováha vodiče

Jak jsme si již objasnili, při průchodu elektrického proudu vodičem vzniká ztrátové teplo. Zákon zachování energie udává, že žádná energie nemůže být vyrobena ani zničena, pouze přetvořena v energii jinou. V našem případě je to obdobné, z celkové hodnoty energie, kterou chceme pomocí vodiče o odporu R přenést, se nám část energie akumuluje v podobě tepla do vodiče, část energie opět v podobě tepla předáme do okolí a poslední část se nám povede převést vodičem a využít ji v užitečnou práci.

$$W_C = W_A + W_Z + W_U \quad (1.6)$$

Kde:

- W_C – Celková energie [W]
- W_A – Akumulovaná energie [W]
- W_Z – Ztrátová energie [W]
- W_U – Užitečná energie [W]

1.3.1 Oteplení vodiče o odporu R protékaného konstantním proudem I

Při průchodu proudu I [A] dlouhým vodičem o odporu R [Ω], začnou vznikat ve vodiči tepelné ztráty s časovým okamžikem dt :

$$dQ = R \cdot I^2 \quad (1.7)$$

Nyní je nutné si uvědomit, že část vytvořeného tepla vlivem průtoku elektrického proudu je předána do okolí (ztrátová energie) a část vytvořeného tepla je akumulována do vodiče (akumulovaná energie). Proto je nutné zavést základní fyzikální vlastnosti materiálu a okolí, aby bylo možné odvodit další výpočet:

Definice potřebných fyzikálních veličin pro teplo předané do okolí:

- $\alpha_0 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ – Součinitel přestupu tepla
- $A [m^2]$ – Ochlazovací povrch vodiče
- $\Delta\vartheta [K]$ – Okamžité oteplení tělesa proti okolí

Vztah pro výpočet množství tepla předaného do okolí:

$$\alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot dt \quad (1.8)$$

Definice potřebných fyzikálních veličin pro teplo akumulované ve vodiči:

- $c [J/m^3 \cdot K]$ – Objemová tepelná kapacita užitého vodiče
- $V [m^3]$ – Objem užitého vodiče

Vztah pro výpočet množství tepla akumulovaného ve vodiči:

$$c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (1.9)$$

Pokud nyní zpětně dosadíme do rovnice zákona zachování energie dostaneme vztah:

$$R \cdot I^2 = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot dt + c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (1.10)$$

Nyní je nutné provést u rovnice separaci proměnných:

$$dt = \frac{c \cdot V}{R \cdot I^2 - \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta} \cdot d\vartheta \quad (1.11)$$

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \ln \left(\frac{R \cdot I^2}{c \cdot V} - \frac{\alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta}{c \cdot V} \right) + K \quad (1.12)$$

Kde:

- K – Integrační konstanta

Nyní je třeba si určit integrační konstantu K . Tu určíme předpokladem, že v čase $t=0$ bylo i oteplení vodiče $\Delta\vartheta=0$ a tím zavádíme počáteční podmínku. Potom:

$$K = \frac{c \cdot V}{\alpha_0} \ln \frac{R \cdot I^2}{c \cdot V} \quad (1.13)$$

Po získání integrační konstanty K je možné ji dosadit do původního vzorce (1.12):

$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \left(1 - e^{\left(\frac{-\alpha_0 \cdot A}{c \cdot V} t \right)} \right) \quad (1.14)$$

Nyní je možné zavést vztah pro výpočet maximálního oteplení v moment dosáhnutí ustáleného stavu tzn. v $t = \infty$

$$\Delta\vartheta_{\infty} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \quad (1.15)$$

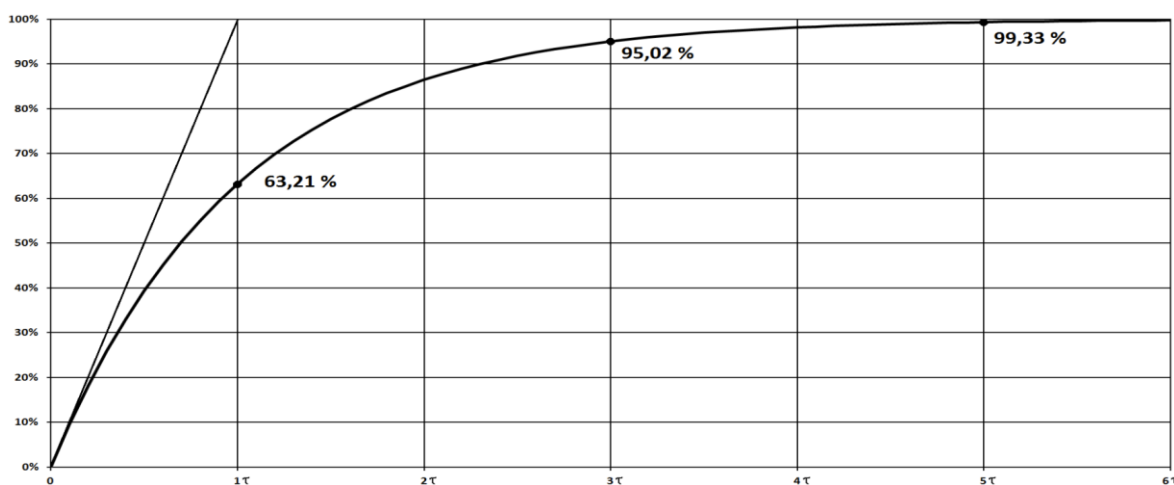
Nyní dopočteme časovou konstantu τ :

$$\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \quad (1.16)$$

Po dosazení a úpravách získáme vztah:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\infty} \cdot \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)}\right) \quad (1.17)$$

Nyní se nám díky odvození vzorce (1.17) podařilo získat křivku časového oteplení. Tato křivka má exponenciální charakter což znamená, že má nejostřejší derivaci v počátku při své nulové hodnotě a přírůstek teploty s časem zpomaluje, až dosáhne své ustálené teploty. Časová konstanta τ nám poté definuje čas, za jaký bychom dosáhli ustálené hodnoty teploty vodiče v případě, že je veškeré uvolněné ztrátové teplo využito na ohřev vodiče a žádné ztrátové teplo není předáno do okolí tzn. $\alpha_0 = 0$. (2)



Obrázek 1.3: Oteplovací charakteristika (4)

Jak je patrné z obr. 1.3 za dobu $t = \tau$ dosáhne oteplení vodiče hodnoty 63,21 %, za dobu $t = 3 \tau$ se dostáváme na hodnotu 95,02 % a v případě $t = 5 \tau$ se dá říct, že jsme dosáhli ustálené hodnoty oteplení, neboť doba 5τ je obvykle považována za dobu dostatečnou vzhledem k tomu, že odchylka od maximální teploty je < 1 %. Pokud by nás zajímala i charakteristika ochlazování vodiče zjistili bychom, že je křivka totožná, ale má opačný trend, tedy se pomalu exponenciálně blíží k nule. (4) (5)

1.3.2 Teplotně ustálený stav

V případě, že námi zvolený proud $I[A]$ protéká vodičem o odporu R dostatečně dlouhou dobu, těleso dosáhne tzv. teplotně ustáleného stavu. To znamená že vodič již není schopný akumulovat další teplo a veškeré teplo způsobené Jouleovými ztrátami v tomto stavu je předáváno do okolí. (5)

$$\frac{\Delta\vartheta}{dt} = 0 \quad , \quad \Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\infty} \quad (1.18)$$

Za uvedených předpokladů nám nyní pod dosazení do rovnice (1.10) vznikne vztah potvrzující výše zmíněné tvrzení o předávání veškerého tepla do okolí v teplotně ustáleném stavu:

$$R \cdot I^2 = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot dt \quad (1.19)$$

1.3.3 Možné modifikace výpočtu

V této práci jsme dosud uvažovali, že vodičem o konstantním odporu a konstantních rozměrech v celé jeho délce protéká konstantní proud. Výpočet se dá ovšem také modifikovat pro různé konkrétní případy, jako například výpočet oteplení při proměnném (přerušovaném) proudu nebo výpočet krátkodobého oteplení, jež simuluje změny topologie obvodu nebo například zkrat. Obvykle při těchto výpočtech dojde ke změně nebo zanedbání části rovnice. Tyto modifikace nejsou pro tuto práci příliš důležité, větší důležitost ovšem v tématice elektrických strojů má izolace vodičů. Ta samozřejmě také ovlivňuje vznik i přenos tepla ve vodiči. (5)

1.3.4 Výpočet oteplení izolovaného vodiče

Nejprve je při výpočtu oteplení izolovaného vodiče nutné definovat některé základní parametry, které je potřeba pro výpočet znát:

- $r_1[m]$ - poloměr vodiče
- $l[m]$ - délka vodiče
- $d[m]$ - tloušťka izolace
- $k[W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$ - tepelná vodivost
- $I[A]$ - proud protékající vodičem
- $R[\Omega]$ - odpor vodiče
- $T_{\infty}[^\circ C]$ - teplota media
- $\alpha_0[W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}]$ - součinitel přestupu tepla

Nyní je potřeba předpokládat, že tepelný přenos probíhá v ustáleném stavu. Již jsme zmínili, že obvod v tomto ustáleném stavu již veškeré vyrobené teplo předává pouze do okolí, a to v radiálním směru od vodiče. Zachováme středovou teplotní symetrii a jednorozměrný přenos tepla. Pro naši potřebu můžeme zanedbat i odpor mezi vodičem a izolací a stanovíme konstantní tepelné vodivosti.

Teplo předávané do okolí je tedy v ustáleném stavu rovno teplu vytvořenému ve vodiči vlivem Jouleových ztrát:

$$Q = R \cdot I^2 \text{ [W]} \quad (1.18)$$

Izolace má na oteplení vodiče zásadní vliv. Snižuje totiž schopnost vodiče odvádět teplo (jelikož má menší tepelnou vodivost) a tím zvyšuje tepelný odpor. Naopak má ale vodič s izolací větší ochlazovací plochu a díky tomu dochází k lepšímu ochlazení vodiče, což naopak tepelný odpor snižuje. (7)

Tyto dva možné odpory, ze kterých se výsledný tepelný odpor R_C skládá, si označíme jako *odpor vedení* R_V a *odpor proudění* R_P . Nyní stanovíme ochlazovací plochu A válcového pláště vodiče:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot l \text{ [m}^2\text{]} \quad (1.20)$$

- r_2 – součet poloměru vodiče r_1 a tloušťky izolace d
- l – délka vodiče

Následně je možné stanovit hodnotu jednotlivých odporů R_V a R_P a jejich součtem určit i celkový odpor R_C :

$$R_P = \frac{1}{\alpha_0 \cdot A} \text{ [}^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}\text{]} \quad (1.21)$$

$$R_V = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \cdot k \cdot l} \text{ [}^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}\text{]} \quad (1.22)$$

$$R_C = R_P + R_V \text{ [}^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}\text{]} \quad (1.23)$$

Teplotu na rozhraní následně určíme z rovnice:

$$Q = \frac{T_1 - T_\infty}{R_C} \quad (1.24)$$

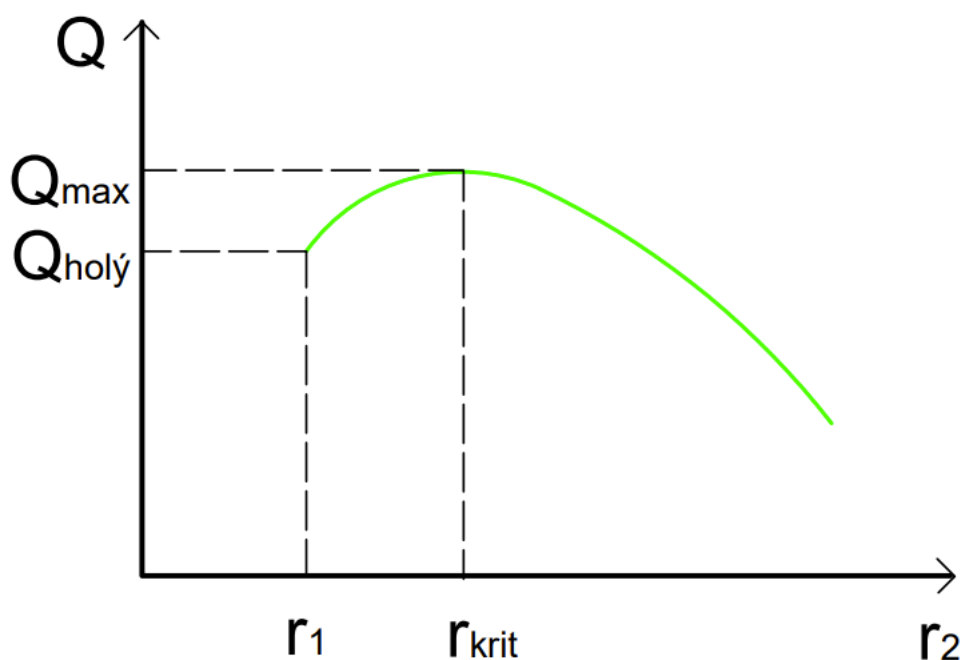
$$T_1 = T_\infty + Q \cdot R_C \quad (1.25)$$

Dosazením do rovnice (1.23) získáme množství tepla přeneseného z izolovaného vodiče do okolí v ustáleném stavu:

$$Q = \frac{T_1 - T_\infty}{R_C} = \frac{T_1 - T_\infty}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \cdot k \cdot l} + \frac{1}{\alpha_0 \cdot A}} \quad (1.26)$$

Je patrné že množství přeneseného tepla je závislé nejen na poloměru izolace r_2 , ale také na tepelné vodivosti izolace k a součiniteli přestupu tepla α_0 . Nejvyšší hodnotu předaného tepla zaznameneáme v případě splnění podmínky $\frac{dQ}{dr_2} = 0$. Řešením této diferenciální rovnice získáme vztah pro kritický poloměr izolace pro válcový vodič.

$$r_{krit} = \frac{k}{\alpha_0} \quad (1.27)$$



Obrázek 1.4: Závislost Q na r_2 (8)

Jak lze vidět na obrázku (1.4), zvedáme-li hodnotu r_2 v intervalu $\langle r_1, r_2 \rangle$ dochází ke zvýšení hodnoty předaného tepla až do momentu, kdy dosáhneme hranice kritické tloušťky izolace $r_2 = r_{krit}$. Právě při této tloušťce izolace dochází k největšímu předání tepla, neboť má izolace velký odpor vedení a zároveň nemá dostatečnou ochlazovací plochu. Právě ta se začne zvětšovat, pokud bude růst i poloměr r_2 a je patrné že s dalším nárůstem tloušťky izolace dochází k menšímu předání ztrátového tepla. (7) (5)

2 Elektrické točivé stroje a jejich izolace

Tato práce se zabývá oteplením vinutí točivého stroje při jeho chodu. Pro další analýzu je tedy nutné porozumět základům technologie elektrických točivých strojů a jejich izolačních materiálů. Z pohledu elektrických točivých strojů se zde omezíme pouze na stroje střídavé, neboť právě ty jsou předmětem této práce.

2.1 Elektrické točivé stroje

2.1.1 Princip

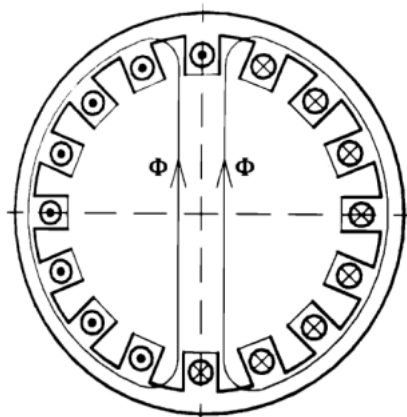
Elektrický točivý stroj je zařízení, které dokáže měnit elektrickou energii na mechanickou a naopak. Tato skutečnost nám naznačuje, že se elektrické točivé stroje dají provozovat ve dvou režimech, a to v motorickém režimu a v generátorickém režimu. Existuje několik druhů točivých strojů a dělí se podle svých základních vlastností, například dle druhu napájecího napětí, dle konstrukce nebo například podle počtu fází. Nyní provedeme pouze základní přehledové dělení:

- **Dle napájecího napětí:**
 - stejnoseměrné
 - střídavé
- **Dle principu působení a konstrukčního provedení:**
 - asynchronní stroje
 - synchronní stroje
 - stejnoseměrné stroje
 - střídavé stroje s komutátorem

Důležité ovšem je, že všechny elektrické stroje pracují na principu elektromagnetické indukce, která dokáže vykonávat relativní pohyb a přeměňovat energii. Proto je možné tvrdit, že každý elektrický stroj se skládá ze čtyř hlavních částí. (9)

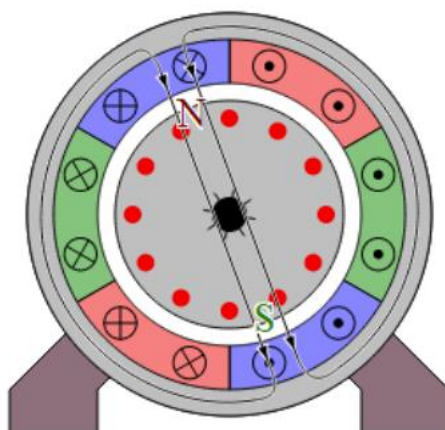
- Magnetický obvod (feromagnetické plechy)
- Vstupní elektrický obvod (měděné vinutí)
- Výstupní elektrický obvod
- Konstrukční části umožňující chod (ložiska, hřídel, ventilátor)

Díky elektromagnetické indukci jsme schopni vytvořit ve stroji točivé magnetické pole. K jeho vytvoření je potřeba nejméně dvou vinutí (v praxi se využívá 3f točivé pole). Pomocí jednoho vinutí jsme totiž schopni vytvořit ve statoru elektrické pulsující pole, nikoliv však točivé magnetické pole. V tomto poli by se magnetický tok uzavíral podél vertikální osy statoru s pulsujícím charakterem viz následující obrázek.



Obrázek 2.1: Jednofázové vinutí statoru (10)

Točivé pole vznikne po přidání druhého vinutí, jež je na to první kolmé a protéká jím harmonický proud posunutý o 90° . V praxi je žádoucí pouze pole s kružnicovým průběhem, a proto je nutné dodržet kolmost a rovnost amplitudy obou vinutí. V praxi používané třífázové vinutí je poté posunuto o 120° a je napájeno stejně posunutými harmonickými proudy. Toto točivé magnetické pole indukuje napětí do rotoru a začne jím procházet proud. Tím dojde ke vzniku magnetického pole v rotoru a společnou interakcí těchto dvou polí dojde k vytvoření elektromagnetického momentu. (9) (10) (11)



Obrázek 2.2: Třífázové vinutí statoru (10)

2.1.2 Asynchronní točivé stroje

Tato práce se zabývá oteplením vzorku vinutí asynchronního motoru a ten nyní zmíníme. Asynchronní motory narozdíl od synchronních nedosahují rychlosti otáčení točivého pole statoru. Vzniká v nich takzvaný skluz:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.1)$$

Kde:

- s – skluz [%]
- n_s – synchronní otáčky
- n – otáčky rotoru

Asynchronní stroj totiž dokáže tvořit moment pouze pokud se liší rychlost otáčení magnetického pole statoru a mechanické otáčky rotoru. Při nenulovém skluzu se magnetický tok statoru spřažený s tokem rotoru pohybuje vůči rotoru, rotorem protéká proměnný (střídavý) spřažený magnetický tok statoru a rotoru, ve vinutí rotoru se indukuje napětí, teče rotorový proud, rotorová část spřaženého magnetického toku stroje je nenulová a vzniká na ní kroučící moment. Kmitočet vinutí statoru je dán kmitočtem sítě. Kmitočet magnetického toku rotoru a na vinutí rotoru je nenulový, je dán skluzem a je rozdílný od kmitočtu, statorového vinutí. (10)

- Rozdělení asynchronních strojů podle výkonu:
 - drobné: do 0,5 kW
 - malé: od 0,5 kW do 15 kW
 - střední: od 15kW do 100 kW
 - velké: nad 100 kW

2.2 Materiály využívané pro stavbu elektrického stroje

Při stavbě elektrického stroje využijeme řadu materiálů, z nichž po každém vyžadujeme určité vlastnosti napomáhající funkci celku. Obecně by se ale tyto materiály daly rozdělit na:

- Materiály elektricky vodivé
- Materiály magneticky vodivé
- Izolační materiály
- Konstrukční materiál

2.2.1 Elektricky vodivé materiály

Nejčastějšími materiály pro tvorbu elektricky vodivých částí (vodičů) jsou měď a hliník, případně slitiny mědi jako jsou mosaz a bronz. Ve výjimečných případech může dojít k použití oceli jako vodiče, například na kroužky synchronních stojů. Měď se používá pro výrobu cívek vinutí strojů a spojovacích vedení. Hliník se velmi často využívá pro výrobu klecí pro asynchronní stroje s klecí na krátko. Slitiny mědi, jsou poté využity pro výrobu kroužků, klecí nebo tlumičů. Zvláštním materiálem využívaným jako vodivá část v elektrických strojích je uhlík. Ten se v různých formách (kovografit, elektrografit) využívá jako kluzný kontakt přenášející energii z rotační části na část statickou. Ve všech zmíněných materiálech nicméně dochází k přeměně energie na teplo při průchodu elektrickým proudem, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole. (13)

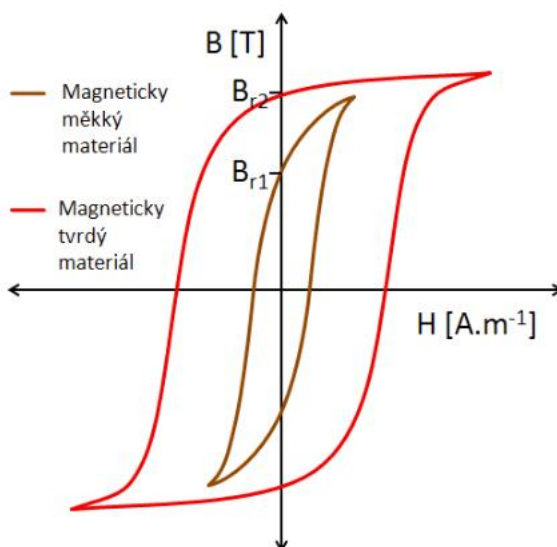
2.2.2 Magneticky vodivé materiály

Nejčastěji užívaným magnetickým materiálem v elektrických strojích jsou speciální ocelové plechy určené přímo pro elektrotechniku. Jsou totiž legované křemíkem což upravuje jejich magnetické vlastnosti. S rostoucím obsahem křemíku začnou klesat hysterezní ztráty, navíc ale křemík zvyšuje měrný elektrický odpor materiálu což vede ke snížení ztrát vířivými proudy. Legování křemíkem ovšem přináší i jisté nevýhody, a to v podobě zvýšení křehkosti plechů. Zvýšená křehkost vede na problematiku tvorby drážek v magnetický částech. U transformátorových plechů se ovšem drážky netvoří a mohou zpravidla mívat vyšší hodnotu podílu křemíku. (13)

V případě magnetických materiálů nám provozem elektrického stroje vznikají dvoje hlavní ztráty vlivem střídavého přemagnetování magnetického obvodu:

- Hysterezní ztráty
- Ztráty vířivými proudy

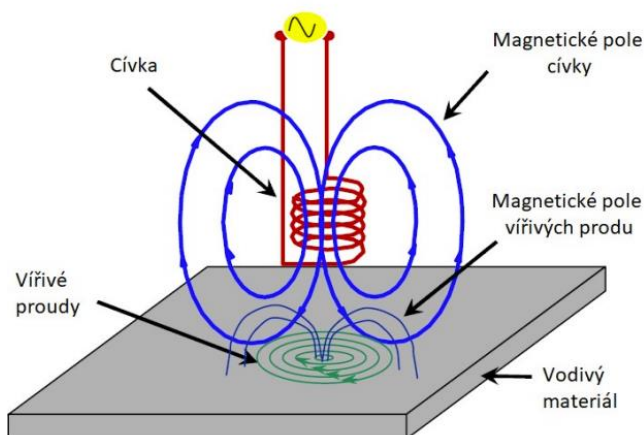
Hysterezní ztráty odpovídají energii potřebné k přemagnetování materiálu a jsou úměrné ploše hysterezní křivky. Jsou lineárně závislé na kmitočtu. K omezení hysterezních ztrát by bylo zapotřebí využít materiálu s užší hysterezní smyčkou, takové materiály nazýváme magneticky měkké například amorfní kov (kovové sklo). (13)



Obrázek 2.3: Příklad hysterezní křivky (14)

Ztráty vířivými proudy vznikají v plošných nebo objemových vodičích, když v jejich okolí dochází ke změně magnetického indukčního toku. V elektrických strojích k této změně dochází vlivem střídavého proudu. Vířivý proud je naindukován do magnetického materiálu a má charakter proudové smyčky, jež se svým magnetickým polem snaží zabránit změně, která jej vyvolala a počáteční budící magnetický tok tak zeslabuje. K největšímu oslabení pak dochází uprostřed průřezu, jelikož je obklopen všemi vířivými proudy.

Ztráty vířivými proudy se omezují použitím vzájemně izolovaných plechů, což prodlužuje proudovou dráhu a tím se zvětšuje míra odporu, nebo například již výše zmíněným přidáváním křemíku, což obdobně zvedá hodnotu odporu a omezuje tak vířivé proudy. (13)



Obrázek 2.4: Ztráty vířivými proudy (15)

Použití navzájem izolovaných plechů ovšem také vnáší do systému určité problémy. Zavádí se zde takzvaný činitel plnění k_{FE} , který je dán měrnou hmotností svazku plechů ku měrné hmotnosti materiálu plechů. Popisuje tedy, jaká část z celku magnetického materiálu je reprezentována vzduchem (vlivem nedokonalého kontaktu dvou plechů) a izolací, a jakou část skutečně zastupuje feromagnetický materiál. Dále je pro zajištění životnosti stroje potřeba odstranit v plechu veškerá pnutí, která by mohla stroj namáhat, to se provádí žíháním plechů. Poslední trend moderní doby v tomto odvětví je takzvaný amorfní kov někdy nazývaný jako kovové sklo, který se vyznačuje svou magnetickou měkkostí a výrazně nižšími ztrátami při přemagnetování. (13)

2.2.3 Izolační materiály

Izolační materiály se v elektrotechnice obecně užívají k oddělení dvou vodivých částí elektrizační soustavy. Je tedy jasné, že hlavní vlastností izolantu je schopnost klást velký odpor průtoku elektrického proudu, a tudíž je hlavním parametrem izolantu rezistivita neboli měrný odpor ρ . Základně se izolační materiály dělí dle skupenství na:

- Pevné izolanty – plasty, slída, keramika
- Kapalné izolanty – minerální oleje
- Plynné izolanty – vzduch, SF₆

Dále se pak mohou dělit na:

- Anorganické – keramika, slída
- Organické – minerální oleje

Nejčastěji se ale izolanty v průmyslu dělí dle své teplotní klasifikace. Teplotní klasifikace stanovuje hodnoty teploty, které může být izolant dlouhodobě vystaven, aniž by došlo k výrazné degradaci materiálu izolantu. Dělí se na třídy:

- Třída Y (do 90 °C) - bavlna, hedvábí, PVC
- Třída A (do 105 °C) - impregnovaný papír, folie z celulózy
- Třída E (do 120 °C) - tvrzené tkaniny, tvrzený papír
- Třída B (do 130 °C) - slída, skleněné vlákny
- Třída F (do 155 °C) - slída, azbest, epoxidové pryskyřice
- Třída H (do 180 °C) - silikonové elastomery
- Třída N (do 200 °C) a třída R (do 220 °C) - porcelán sklo a křemen ve spojení s anorganickými pojivy (16)

Izolační systém elektrického stroje se skládá z několika menších celků, ve stroji je totiž nutné vzájemně izolovat celou řadu konstrukčních částí, jako například:

- Izolace vodičů vinutí (smalt, skelná vlákna)
- Izolace cívek (slída, tkaniny)
- Izolace drážek (izolační fólie)
- Drážkové klíny (sklotextil)

Provozem zařízení dochází k namáhání celého izolačního systému, což vede na postupnou degradaci materiálu, někdy také hovoříme o stárnutí materiálu. Tato degradace časem vede k zhoršení sledovaných fyzikálních vlastností materiálu. K degradaci může docházet hned několika vlivy, ať už elektrickými (napětové namáhání, Jouleovy ztráty) nebo mechanickými (vibrace). Jak pro naši práci, tak obecně je ovšem nejčastějším zdrojem degradace izolace teplo vzniklé provozem elektrického stroje. Kromě již zmíněného Jouleova tepla vzniká v izolantech teplo ještě vlivem dielektrických ztrát v izolantu a teplo vzniklé výbojovou činností. (13)

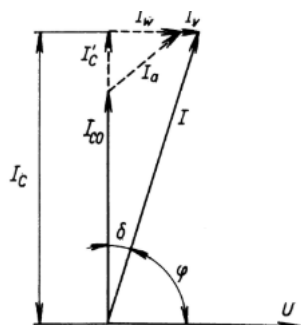
Působením proměnného elektrického pole na dielektrikum vznikají dielektrické ztráty, jež představují celkovou energii ztracenou v dielektriku a jsou reprezentovány třemi složkami:

- Vodivostními ztrátami (vznikají vlivem srážek volných nosičů náboje s kmitajícími částicemi)
- Polarizačními ztrátami (vznikají vlivem polarizace dielektrika)
- Ionizačními ztrátami (vznikají u plynů vlivem překročení prahu ionizace daného plynu)

Způsobují ohřev dielektrika a změnu fázového posuvu mezi napětím a proudem. Velikost a vliv těchto ztrát závisí na mnoha faktorech materiálu, například na druhu, struktuře, obsahu příměsí a nečistot apod. (3)

Velikost ztracené energie přeměněné na teplo vlivem dielektrických ztrát se vyjadřuje pomocí ztrátového činitele $tg\delta$. V ideálním případě by se mělo dielektrikum v obvodu chovat jako ideální kondenzátor a jeho proud by měl předbíhat napětí ve fázorovém diagramu o 90° . V reálných případech tomu ale tak není a náhradní schéma dielektrického

materiálu je spíše sériové nebo paralelní spojení kondenzátoru a odporu. Proud tedy nepředbíhá napětí o úhel $\frac{\pi}{2}$ nýbrž o úhel $\frac{\pi}{2} - \delta$ jak je patrné z obr (2.5). (17)



- I_{C0} - kapacitní proud ideálního dielektrika
- I'_C - kapacitní jalová složka absorpčního proudu
- I_W - činná složka absorpčního proudu
- I_A - absorpční proud vyvolaný polarizacemi
- I_V - vodivostní proud (vlivem konečného odporu)
- I – proud reálného dielektrika

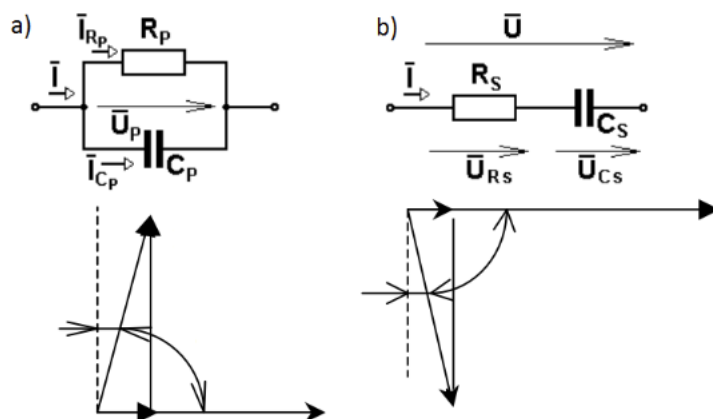
Obrázek 2.5:Fázorový diagram reálného dielektrika (18)

Jak již bylo zmíněno, pro výpočet velikosti ztrátového proudu dojde k náhradě sériovou nebo paralelní kombinací odporu a kondenzátoru, následně dostaneme pro výpočet $\text{tg} \delta$ následující vztah:

$$\text{tg} \delta = \omega \cdot C_S \cdot R_S = \frac{1}{\omega \cdot C_P \cdot R_P} \quad (2.2)$$

kde:

- $\text{tg} \delta$ – ztrátový činitel [-]
- ω – úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]
- $C_{S(P)}$ – kapacita kondenzátoru [F]
- $R_{S(P)}$ – Odpor rezistoru [Ω]



Obrázek 2.6: a) Paralelní spojení R c) Sériové spojení R s (18)

2.3 Vinutí elektrických točivých strojů

Vinutí elektrických točivých strojů je základním pilířem funkčnosti tohoto stroje. Právě díky vinutí a fyzikálním pochodům jež se v něm odehrávají je možné přeměnit elektrickou energii na energii mechanickou a naopak. V elektrických strojích se obvykle nacházejí hned dvě vinutí, a to vinutí satorové a vinutí rotorové. Jedná se o vzájemně pospojované závity (cívky) se spráženým tokem pro správnou funkci stroje. Druh a provedení vinutí použitého u určitého typu stroje je závislé na celé řadě faktorů. Druh vinutí záleží na druhu stroje (asynchronní, synchronní, stejnosměrný), na tom, v jakém prostředí se bude stroj nacházet (uvnitř, venku, chemické vlivy), záleží také na konstrukci stroje a na tom, jaká třída izolace je vyžadována. (13)

2.3.1 Nároky kladené na vinutí

Vinutí při své funkci musí odolávat celé řadě fyzikálních vlivů, které ve stroji vznikají, aby byl zaručen správný chod stroje. Z hlediska elektrických fyzikálních veličin je třeba zajistit dostatečnou elektrickou pevnost izolace. Jakýkoliv průraz izolace celkem jistě znamená destrukci stroje. Snažíme se o to, aby byl stroj správně elektricky využit. Stroj při své funkci dosahuje vysokých otáček, a tak je nutné, aby bylo vynutí schopné odolávat velkým odstředivým silám a dynamickému namáhání. Tyto dynamické děje dále vedou na vibrace stroje, na které musí být vinutí též dimenzováno. Posledním požadavkem na elektrické vinutí je dobrý odvod vytvářeného tepla vlivem provozu stroje. Vzniku tohoto tepla je věnována celá předchozí kapitola a vyplývá, že je teplo při provozu stroje nežádoucí a je třeba ho ze stroje efektivně odvádět pryč. (16)

2.3.2 Funkce vinutí v elektrických strojích

Zatím jsme v této kapitole zmínili, že se elektrický točivý stroj skládá obvykle ze dvou vinutí, a to vinutí satorové a vinutí rotorové. Vinutí ale existuje z pohledu funkčnosti více a vykonávají celou řadu dalších funkcí pro správný chod zařízení.

- **Vstupní/Výstupní vinutí**

Slouží, jako přívod energie ze sítě, pro buzení stroje v případě motorického režimu, případně pro odvod vyrobené energie do sítě, v případě generátorického režimu.

- **Budicí vinutí**

Slouží k vytvoření a uspořádání hlavního magnetického toku.

- **Kotevní vinutí**

Vinutí uložené v drážkách kotvy. Vlivem točivého magnetického pole se do něj indukují magnetický tok a vzniká tak indukované napětí a moment stroje.

- **Kompenzační vinutí**

Důsledkem nehomogenity magnetického pole dochází k napěťovým rozdílům mezi sousedními lamelami komutátoru (u SS strojů), které by mohli způsobit přeskok. Kompenzační vinutí tyto vlivy oslabuje.

- **Tlumící vinutí (tlumič)/ Rozběhové vinutí**

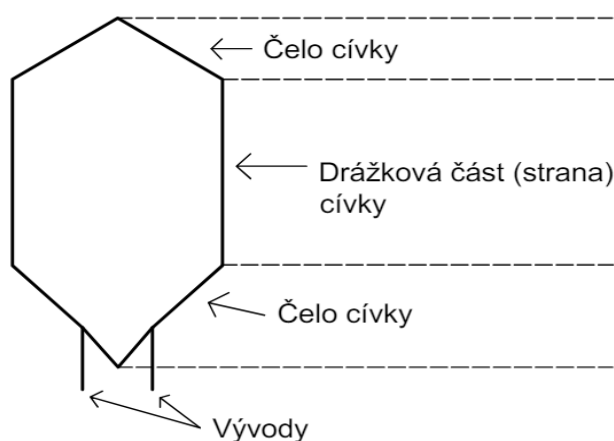
Jedná se o klec na krátko, skládající se z vzájemně propojených tyčí. U synchronních strojů plní funkci tlumiče (omezuje kmitání synchronního stroje). Dá se také použít na asynchronní rozběh synchronního motoru. Obvykle se tyče umísťují do pólových nastavců.

- **Vyrovnávací vinutí**

V případě nesymetrií sítě slouží vyrovnávací vinutí k odstranění tohoto nežádoucího jevu.

2.3.3 Konstrukce vinutí elektrických strojů

Tou nejjednodušší částí elektrického vinutí je vodič, který má své konkrétní uložení ve stroji, a tvoří tak závit. Spojení několika takových závitů dohromady dá vzniknout cívice. Cívky tohoto vinutí jsou uloženy v drážkách rotoru a statoru.



Obrázek 2.7: Jednotlivé části závitu vinutí (13)

Jak lze vidět na obr. (2.7) závit se skládá z dvou stran a ze dvou čel. Strany závitu se ukládají do drážek a nazývají se tak drážková část cívky (závitu). Každá ze stran závitu je umístěna pod jiným pólem. Strany cívek spojují čela cívek, jež nejsou uloženy v drážkách.

Vinutí se skládá z izolovaných vodičů, které jsou buď vkládány do otevřených drážek nebo vsypávány po jednotlivých závitech u strojů s polouzavřenými drážkami. Jednotlivé vodiče mohou mít různý tvar jak kruhového, tak obdélníkového průřezu, ovšem obdélníkové průřezy lépe vyhovují drážkám, a proto se používají častěji.

2.3.4 Druhy střídavých vinutí z hlediska konstrukce

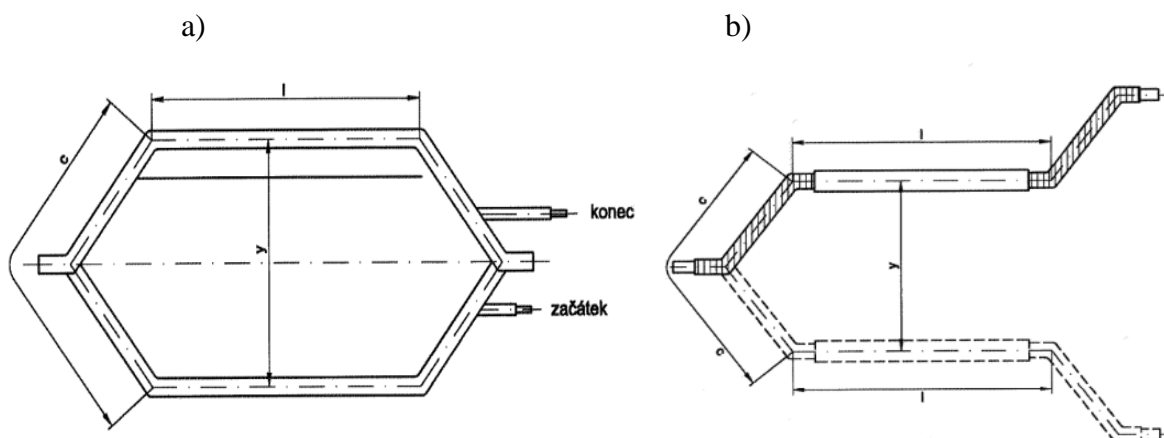
○ Podle počtu fází

Obecně se mohou elektrické točivé stroje zhotovovat m-fázové, standardně se ale tvoří vinutí jednofázová, dvoufázová, trojfázová (vícefázová)

○ Podle způsobu provedení

Cívková vinutí – Jsou vyrobena z vzájemně izolovaných vodičů, které jsou v případě polouzavřených drážek vsypávány po jednotlivých závitech, případně vkládány jako celek včetně cívkové izolace do strojů s otevřenými drážkami.

Tyčová vinutí – Na první pohled se obvykle jedná o masivní vodič, po bližším prozkoumání ovšem zjistíme, že se jedná o svazek dílčích vzájemně izolovaných vodičů. Toto provedení s sebou přináší spoustu žádoucích účinků. Díky složení z dílčích izolovaných vodičů dojde k ideálnějšímu rozložení proudové hustoty, dále k výraznému omezení vířivých proudů vlivem natažení proudové dráhy a zmenšení průřezu vodiče a v neposlední řadě také k omezení vnitřních vyrovnávacích proudů. U strojů velkých výkonů se někdy používá takzvaného permutovaného vinutí tvořeného Reoblovými tyčemi. Toto vinutí má v elektrickém stroji podobnou roli jako transponované vedení elektrizační soustavy. Správným zkroucením Reoblových tyčí docílíme ideálního rozložení fyzikálních veličin mezi fázemi (mezi fází a zemí). (13)



Obrázek 2.8:a) Cívkové vinutí b) Tyčové vinutí (13)

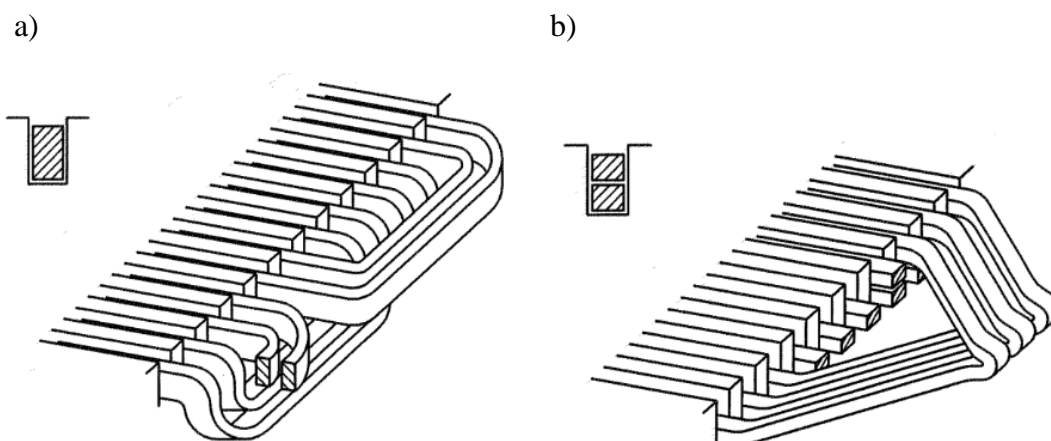
○ **Podle uložení cívek v drážkách**

Jednovrstvá vinutí – Vyznačuje se tím, že se vždy v každé drážce stroje vyskytuje pouze jedna cívková strana. Všechny cívkové strany leží v jedné úrovni a každá cívková strana prochází jednou drážkou směrem k zadní straně cívky a jinou drážkou se vrací k přední straně cívky. Tím že každá cívka využije dvě drážky je jasné, že počet cívek je poloviční, než počet drážek: (19)

$$N_C = \frac{Q}{2} \quad (2.3)$$

Dvouvrstvá vinutí – U těchto vinutí leží v každé drážce stroje dvě strany cívky, a to ve dvou výškových úrovních. Cívka má jednu stranu uloženou v dolní části drážky, přičemž na vrchní pozici se nachází zpětná cívková strana jiného závitu a druhou cívkovou stranu uloženou v jiné drážce ovšem na vrchní úrovni, pod kterou opět leží cívková strana jiného závitu. V tomto případě se počet cívek rovná počtu drážek. Dvouvrstvá vinutí nabízí výhodu zkrácení kroku, což přispívá ke zlepšení tvaru magnetického pole. Nicméně nevýhodou je, že při tomto zkrácení dochází k tomu, že cívky různých fází jsou umístěny do jedné drážky. Proto musí být závity vzájemně izolovány tak, aby byly odolné vůči plnému sdruženému napětí. Vzdálenost stran jedné cívky se nazývá cívkový krok. Odpovídá pólové rozteči a počítá se v drážkách. Pokud máme cívkový krok například 7 drážek, znamená to, že přívod povede například drážkou číslo 1 a vývod tím pádem drážkou číslo 8. Cívkový krok se spočítá takto:

$$y = \frac{Q}{2p} \quad (2.4)$$



Obrázek 2.9:a) Jednovrstvé vinutí b) Dvouvrstvé vinutí (13)

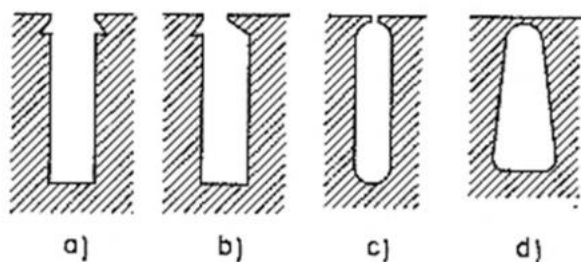
○ Podle tvaru cívek

Vinutí se stejnými cívkami – Jak již název napovídá, využíváme zde stejného tvaru všech cívek ve stroji. Toto vinutí má svou největší výhodu v homogenitě elektrických veličin (fáze mají stejný odpor a reaktanci, jelikož jsou složeny z identických cívek). Sledujeme tedy ideálnější rozložení elektrických veličin ve stroji.

Vinutí se soustředěnými cívkami – Na rozdíl od předchozího vinutí, má vinutí se soustředěnými cívkami jiný rozměr a tvar cívek, neboť střídavá vinutí nemusí mít nutně stejný cívkový krok. Nevýhodou tohoto vinutí ovšem je nerovnoměrné rozložení odporu a reaktance.

2.3.5 Druhy drážek

Existuje celá škála drážek elektrických strojů, které mohou mít různou velikost i tvar. Z obecnějšího hlediska ovšem drážky dělíme podle toho, zda jdou otevřené, polouzavřené nebo uzavřené. Na jejich tvaru poté závisí způsob, jakým budou do drážek umístěny jednotlivé vodiče, jak již bylo zmíněno výše. Drážky otevřené nebo polootevřené obvykle značíme velkými písmeny, pro odlišení se tedy drážky uzavřené označují písmeny malými.



Obrázek 2.10: Drážky elektrického stroje a) otevřené b) c) polouzavřené d) uzavřené (11)

2.4 Chlazení elektrických strojů

Tato práce se zabývá především ohřevem závitů vinutí asynchronního motoru a degradace jeho izolace při překročení povolené teploty. Je tedy nutné abychom si v následující kapitole alespoň přiblížili základní druhy chlazení takového stroje. Chlazení zastává v této problematice velkou roli, neboť je nutné veškeré ztrátové teplo vytvořené provozem stroje odvádět pryč, pro zachování správné funkčnosti a životnosti. Existuje celá řada druhů chlazení, používají se různá média, skupenství a systémy.

V první řadě si chladicí systémy rozdělíme podle jejich základních vlastností a provedení:

- Dle směru toku chladicího média – radiální / axiální / axiálně radiální
- Dle oběhu chladicího média – otevřený oběh / uzavřený oběh
- Dle způsobu chlazení – přímé chlazení / nepřímé chlazení

2.4.1 Konkrétní druhy chlazení

○ Přirozené chlazení

Nejčastější u strojů menších výkonů, kde není potřeba výrazného odvodu ztrátového tepla. Stroje mají buď dostatečnou ochlazovací plochu, a stačí předávat teplo do okolí přirozeně, případně se používá chladičů, v podobě ochlazovacích žeber s dobrou tepelnou vodivostí, jež dokáže stroj spolehlivě udržet v provozních teplotách.

○ Vlastní chlazení

Využívá se u takových strojů, které ještě nevyžadují některý z efektivnějších způsobů chlazení, ovšem nemají dostatečnou ochlazovací plochu na použití přirozeného chlazení. V tomto případě je obvykle instalován na hřídel stroje ventilátor, který během provozu vhání vzduch jako médium do stroje a tím ho ochlazuje. Nevýhodou je, že je ventilátor závislý na otáčkách stroje a tím pádem je na nich závislý i jeho chladicí efekt.

○ Cizí chlazení

V podstatě se jedná o předchozí chlazení ovšem s tím rozdílem, že je zde odstraněna nevýhoda se závislostí otáček ventilátoru na otáčkách stroje. V tomto případě je totiž chlazení prováděno vnějším zařízením, jež není na hřídeli stroje. Ventilace je tu totiž prováděna s cizím zdrojem, který vhání médium do stroje a tím ho ochlazuje.

○ Chlazení kapalinou

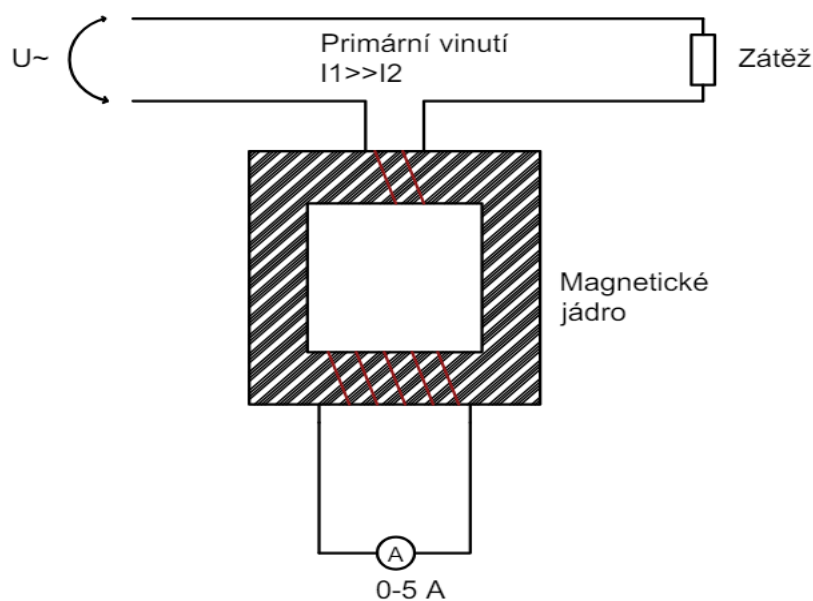
Existují dva základní způsoby kapalinového chlazení. První možností je, že je stroj celý ponořen do média, které má lepší koeficient přestupu tepla než vzduch a tím dochází k efektivnějšímu ochlazení. Druhou možností je stroj přímo protékáný chladícím médiem proudícím v chladicím systému. Médium odebere při průtoku strojem ztrátové teplo, které následně předá do okolí. Hlavní problematikou u této metody je nutná perfektní těsnost celého systému. Další nevýhodou je, že použití této metody vyžaduje přístup k vodě a je třeba počítat s náklady na vodohospodářství (údržba, provoz).

○ Chlazení plynem

Nejefektivnější chlazení plynem se provádí tak, že se pro vinutí stroje použijí duté vodiče, jež jsou následně protékány chladícím médiem (plynem) a tak odvádí ze stroje ztrátové teplo, v tomto případě se jedná o chlazení přímé. Nejčastěji se jako chladící plynné médium používá vodík. Při použití vodíku je potřeba speciálního návrhu stroje, směs vodíku a vzduchu je totiž třaskavá, a proto se stroj navrhuje tak, aby se předešlo případné nehodě. Stejně jako u předchozího druhu chlazení zde vznikají problémy s nutným plynovým hospodářstvím a velmi spolehlivým utěsněním stroje. (19) (20)

3 Elektrické netočivé stroje – proudový transformátor

Transformátory proudu, někdy také nazývané „snižovací“ transformátory proudu se obvykle využívají jako měřicí převodník a spadají do kategorie elektrických strojů netočivých. V případě, kdy nám primární stranou protéká velký střídavý proud, který potřebujeme měřit, ale nemáme dostatečný rozsah měřicího přístroje, nám proudový transformátor pomůže snížit proud na sekundární straně tak, abychom se dostali do měřitelných hodnot. Obecně se svými konstrukčními částmi tento typ transformátoru od běžného transformátoru téměř neliší. Také se skládá ze dvou vinutí, primárního a sekundárního, jež nejsou galvanicky spojeny. Tok energie z primárního vinutí na sekundární je zajištěno magnetickým obvodem (jádrem) jež je tvořeno vrstvami křemíkové oceli. (21)



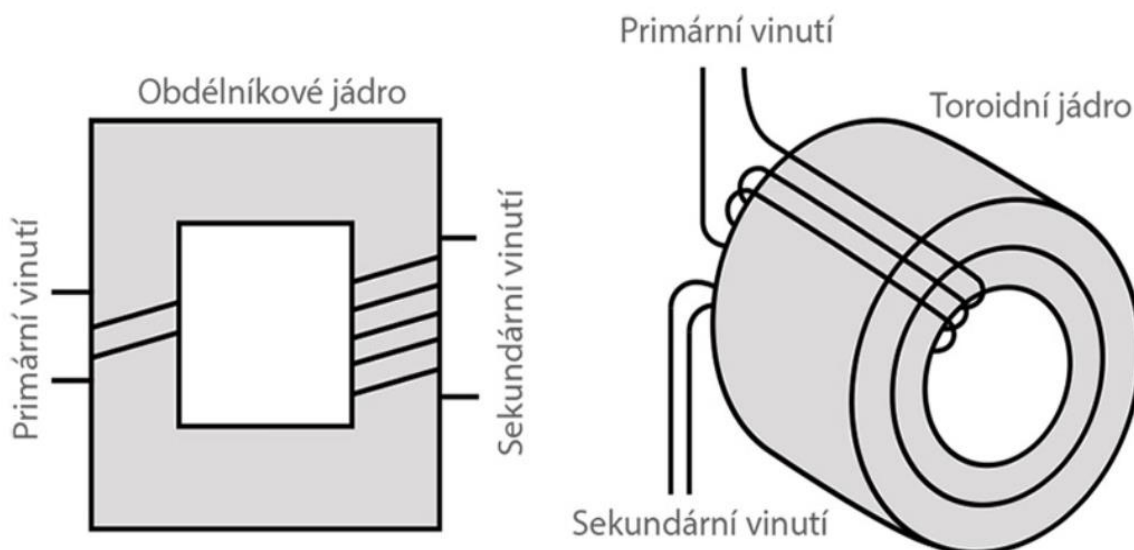
Obrázek 3.1: Základní schéma proudového transformátoru (21)

V běžných případech se obvykle primární vinutí skládá z malého počtu závitů, případně i z jednoho závitu, který je obvykle tvořen masivnějším vodičem z důvodu průtoku velkého proudu na primární straně transformátoru. Naopak sekundární vinutí obvykle sestává z většího počtu závitů (desítky až stovky) a je vyrobeno z vodičů menšího průřezu, neboť je obvykle sekundární strana transformátoru dimenzována do 5 A.

Obecně podle konstrukce dělíme transformátory proudu na dva typy, a to na transformátory vinutého typu a transformátory tyčového typu.

3.1 Transformátory vinutého typu

V podstatě se jedná o již zmíněný princip i konstrukci. V transformátoru se nachází obě vinutí, jak primární, tak sekundární obě navinuté na magnetickém jádře se svým příslušným počtem závitů. Podle konstrukce poté můžeme mít vinuté transformátory s obdélníkovým magnetickým jádrem a s toroidním magnetickým jádrem viz obr. (3.2).



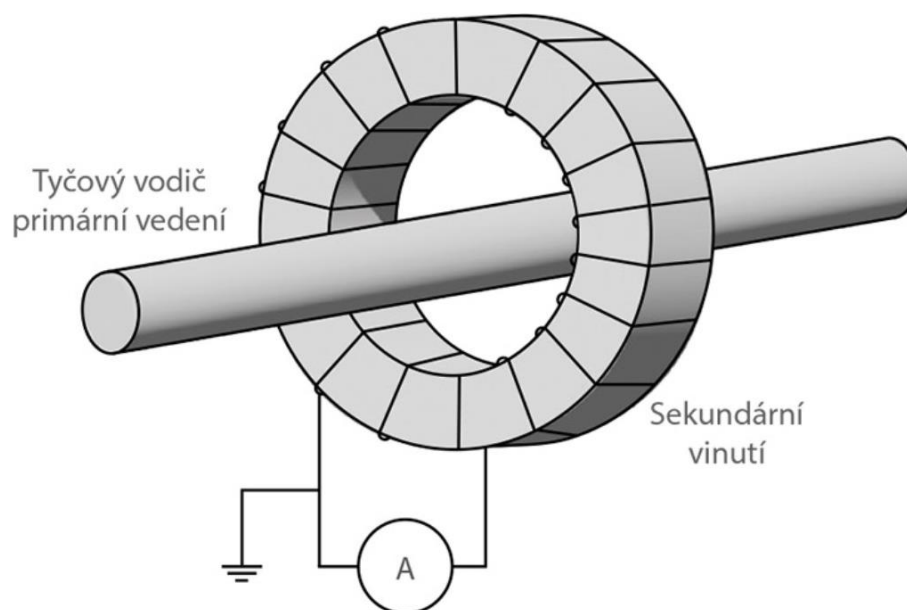
Obrázek 3.2: Konstrukce obdélníkového jádra a toroidního jádra (21)

Oba typy fungují na principu zmíněném v předchozí kapitole. Jedinou odlišností je to, že u toroidního jádra je primární vinutí navinuto přes vinutí sekundární a musí být navržena vhodná izolace mezi oběma vinutími.

Je potřeba mít na paměti, že sekundární obvod transformátoru nesmí být nikdy rozpojen v moment, kdy je primární vinutí pod napětím. Pokud by bylo v tento moment sekundární vinutí rozpojeno, dojde k výraznému nárůstu napětí na sekundární straně což může vést k degradaci izolace mezi závity nebo ke smrtelnému úrazu elektrickým proudem v případě dotyku. Dále vznikají nadměrné ztráty a teplo v jádře. (21)

3.2 Transformátory tyčového typu

Zvláštností tohoto typu zapojení je fakt, že se tu ve skutečnosti nevyskytuje žádné primární vinutí na jádře transformátoru. Primární vinutí je totiž tvořeno tyčovým vodičem, kolem kterého se uzavírá magnetické jádro transformátoru, na kterém je navinuto sekundární vedení. Průtok proudu tyčovým vodičem indukuje magnetický tok do jádra, který vytvoří odpovídající napětí mezi vývody sekundárního vinutí. Pro správnou funkci a co největší přesnost zařízení je nutné zařídit co nejmenší vzdálenost mezi tyčovým vodičem a jádrem transformátoru, jinak dochází k tzv. „úniku proudu“.



Obrázek 3.3: Transformátor tyčového typu (21)

3.3 Převod proudového transformátoru

Pokud u proudového transformátoru uvažujeme hodnoty N_1 a N_2 jako počet závitů na primární a sekundární straně a hodnoty I_1 a I_2 jako velikost proudu primární a sekundární strany, potom platí že poměr mezi proudem a závity primární a sekundární strany má inverzní charakter. Z pohledu napětí se transformátor chová jako zvyšovací, neboť indukuje na sekundární vinutí velké hodnoty napětí oproti vinutí primárnímu.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.1)$$

Jakmile je nám tedy známý převod transformátoru a měříme proud protékající sekundárním vinutím, jsme schopni určit velikost proudu protékaného vinutím primárním.

(21)

4 Měření teploty

Existuje celá škála fyzikálních principů, díky kterým se dá měřit teplota daného tělesa. Teplota sama o sobě je ale téměř neměřitelná a obvykle měříme jinou veličinu, která je teplotně závislá a podle ní a příslušných vztahů jsme potom obvykle schopni teplotu tělesa vyčíslit. V následující tabulce je vyobrazen přehled známých typů měření teploty, z nichž si následně rozebereme ty nejdůležitější pro naši práci.

Tabulka 4.1: Přehled měřicích metod teploty (22)

Skupina teploměru	Typ teploměru	Fyzikální princip	Teplotní rozsah (°C)	
Dilatační teploměry	Plynový	Změna tlaku	-5	500
	Tenzní	Tenze par	-40	400
	Kapalinový	Změna objemu	-200	750
	Kovový	Délková roztažnost	0	900
Elektrické teploměry	Termoelektrický	Termoelektrický jev	-200	1700
	Odporové kovové	Změna elektrického odporu	-250	1000
	Odporové polovodičové	Změna prahového napětí	-200	400
Speciální teploměry	Keramické žároměrky	Bod měknutí	600	2000
	Teploměrná tělíska	Bod tání	100	1300
	Teploměrné barvy	Změna barvy	40	1350
Bezdotykové teploměry	Širokopásmové pyrometry	Zachycení veškerého teplotního záření	-40	5000
	Monokrystalické pyrometry	Zachycení úzkého svazku teplotního záření	100	3000
	Poměrové pyrometry	Srovnání dvou svazků teplotního záření o různých vlnových délkách	700	2000
	Termovize	Snímání teplotního obrazu tělesa	-30	1200

Jak je znázorněno v předešlé tabulce, existuje celá řada různých druhů teploměru, fungujících na různých principech. Většina z nich ovšem obsahuje části, jež jsou společné pro většinu teploměru. Jednou z takových částí je senzor teploty. Jedná se o vstupní část celého systému, jež bývá v přímém styku s měřeným zařízením. Součástí celého senzoru teploty je poté čidlo teploty, jež převádí teplotu na jinou fyzikální veličinu, jež je teplotně závislá. Dále je nutné upozornit, že ne všechny způsoby měření tepla vyžadují přímý dotyk s měřeným systémem. Proto dále dělíme měření teploty na dotyková a bezdotyková. Další dělení tepelných senzorů je na senzory aktivní a pasivní. Senzory aktivní se vlivem teploty chovají jako zdroj elektrické energie, kterou následně měříme a dle její velikosti odvodíme

i míru teploty v měřeném zařízení. Naopak pasivní senzory teploty vyžadují elektrické napájení pro transformaci teploty na jinou veličinu. (22)

4.1 Dilatační teploměry

Jak již název napovídá, jedná se o skupinu senzorů, jež využívají objemové nebo délkové roztažnosti různých látek (plynných, kapalných i pevných). Fyzikální veličiny, na které v tomto případě teplotu převádíme jsou měření tlaku, objemu nebo délky.

4.1.1 Plynové teploměry

Je známo, že tlak plynu při neměnném objemu je přímo závislý na teplotě. Teploměr se obecně skládá z jímky (baňka ve které uchováváme plyn), spojovací kapiláry a měřicího ústrojí jež je zde obvykle zastoupeno tlakoměrem. Nejčastěji používanými plyny jsou poté dusík nebo hélium.

$$p = \frac{n \cdot R}{V} \cdot T = k \cdot T \quad (4.1)$$

Kde:

- p – Tlak plynu [Pa]
- V – Objem plynu [m^3]
- n – Látkové množství [mol]
- R – Molární plynová konstanta [$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$]
- T – Termodynamická teplota [K]

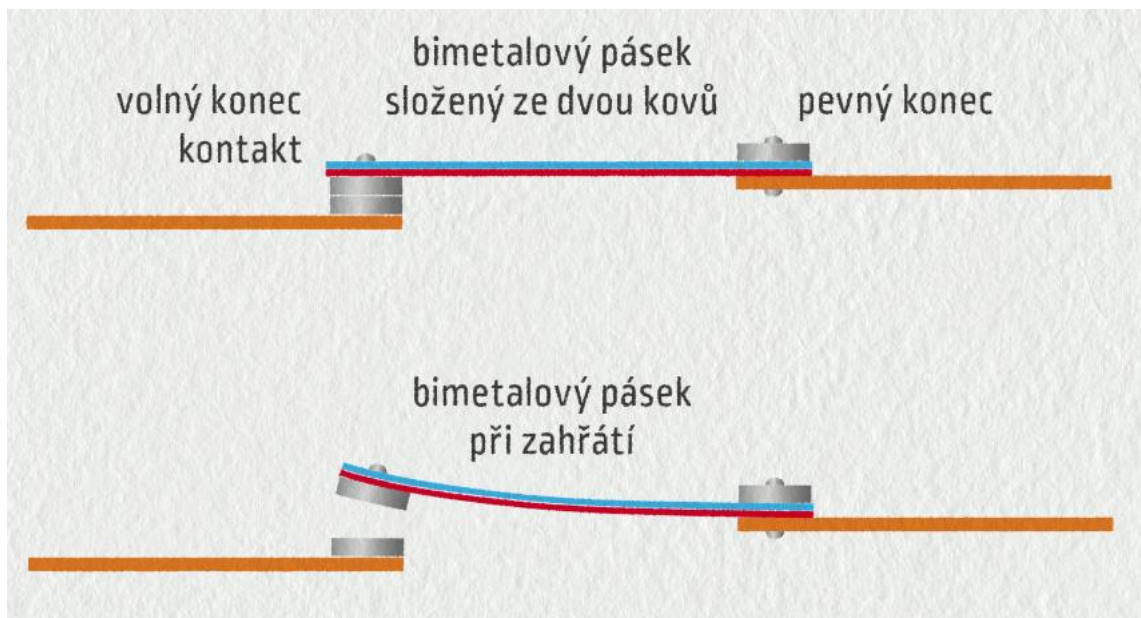
4.1.2 Teploměry kapalinové

Princip je obdobný jako v předchozí kapitole, využívá se zde změny objemu kapaliny s rostoucí teplotou. Nejzákladnějším kapalinovým senzorem tepla je klasický rtuťový teploměr. S rostoucí teplotou začne rtuť měnit svůj objem a v úzké kapiláře teploměru začne stoupat. Míra vzrůstu nám následně prozradí teplotu měřeného zařízení. Princip dalších kapalinových teploměrů je obdobný, ovšem odstraňuje některé problémy zmíněného rtuťového teploměru, jako jsou křehkost a obtížnost přenosu údaje teploměru. (22)

4.1.3 Dilatační kovové teploměry

Jsou založeny na principu různé délkové roztažnosti dvou kovů. Nejčastějším senzorem používaným v praxi je bimetalický teploměr. Jedná se o dva kovy s různou délkovou roztažností, jejichž konce jsou spojeny k sobě. Vlivem narůstající teploty začnou kovy měnit svou délku, ovšem každý v jiném poměru. Pásek se tedy začne ohýbat na tu stranu, kde se

vyskytuje kov s menší teplotní roztažností. Jeden konec celého bimetalického pásku je pevně uchycen, zatím co druhý nám svou odchylkou dává údaj o měřené teplotě, je tak spojen s ukazatelem nebo může být přímo připojen na spínač v případě dvupolohového ovládání teploty. (22)



Obrázek 4.1: Princip bimetalového pásku (23)

4.2 Elektrické teploměry

Teploměry využívají elektrických veličin ke stanovení teploty tělesa, jako je například elektrický odpor, změna prahového napětí nebo termoelektrický jev.

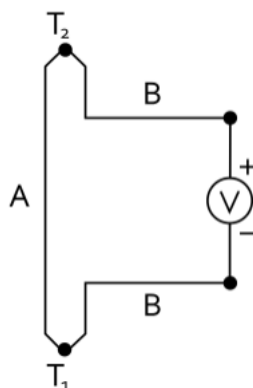
4.2.1 Termoelektrické články

Termoelektrické články jsou senzory teploty, jejichž princip zakládá na tzv. Seebeckově jevu. Jedná se o jev, kdy dochází k přímé přeměně rozdílu teplot na elektrické napětí. Jevo popisuje vznik napětí mezi dvěma konci kovového materiálu v případě, že je mezi těmito konci teplotní gradient ΔT . V tom případě dochází k tomu, že nosiče náboje v teplejším spoji vodiče difundují do míst chladnějších ve větším množství, než difundují nosiče náboje z chladnějších míst do míst teplejších. Tím dochází k rozdílu potenciálů mezi těmito dvěma konci a vzniká tak měřitelné napětí. Toto napětí poté stanovuje teplotu měřeného tělesa. Vzniklé napětí se pohybuje v řádu $\text{mV}/^\circ\text{C}$. (22)

$$U = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (4.2)$$

Kde:

- S_B, S_A - Seebeckovi koeficienty kovů A a B
- T_1, T_2 - Teploty spojů [K]
- U - Elektrické napětí mezi oběma konci [V]



Obrázek 4.2: Schematické znázornění termočlánku (24)

Jelikož jsou Seebeckovi koeficienty silně závislé na teplotě, v praxi se normalizovali materiály, ze kterých se termočlánky vyrábějí tak, aby byly potlačeny nepříznivé jevy a zaručeny dobré podmínky pro funkci termoelektrického článku. Jedná se o materiály s přijatelnou nelinearitou závislosti termoelektrického napětí na teplotě, a především zajištění dobré odolnosti proti korozi a chemickým vlivům.

Tabulka 4.2: Přehled termoelektrických článků (22)

Označení	Složení	Dlouhodobé vystavení teplotě °C	Krátkodobé vystavení teplotě °C
K	NiCr (+) NiAl (-)	0 až +110	-180 až +1350
T	Cu(+) CuNi (-)	185 až +300	-250 až +400
J	Fe (+) CuNi (-)	+20 až +700	-180 až +750
N	NiCrSi (+) NiSiMg (-)	0 až +1100	-270 až +1300
E	NiCr (+) NiNi (-)	0 až +800	-40 až +900
R	PtRh13 (+) Pt (-)	0 až +1600	-50 až +1700
S	PtRh10 (+) Pt (-)	0 až +1550	-50 až +1750
B	PtRh30 (+) Pt (-)	+100 až +1000	+100 až +1820
G	W (+) WRh(-)	+20 až +230	0 až +2600
C	WRh5 (+) WRh26 (-)	+50 až 1820	+20 až +2300

Jak je patrné, je možné termoelektrické články krátkodobě přetěžovat, aniž by došlo k jejich destrukci. To, do jaké míry lze termoelektrický článek využít krátkodobě a dlouhodobě je dáno konstrukcí snímače a průměru termoelektrických vodičů. (22)

4.2.2 Odporové kovové teploměry

Kovové odporové teploměry využívají principu změny odporu materiálu při změně jeho teploty. Teplotní závislost odporu kovu nám tedy umožňuje stanovit přírůstek teploty daného tělesa dle změny odporu materiálu. Měřenou veličinou je v tomto případě rezistivita daného materiálu. Míru závislosti odporu na teplotě nám popisuje veličina zvaná teplotní součinitel odporu α . Stanovuje závislost odporu daného materiálu na teplotě.

Pro realizaci kovových odporových teploměrů se obvykle využívá čistých kovů s co největším teplotním součinitelem odporu. Obvykle se nejčastěji využívá kovů jako je měď, platina a nikl. Ze zmíněných kovů se nejčastěji využívá platina, jelikož se dá získávat téměř v čistém stavu a má dobré chemické i fyzikální vlastnosti. Nikl má oproti platině problém právě s těmito vlastnostmi, ovšem při použití niklu můžeme očekávat vyšší přesnost. U mědi je její malá odolnost vůči chemickým vlivům hlavním problémem.

Tabulka 4.3: Přehled materiálů pro kovové odporové teploměry

<i>Materiál</i>	<i>$a \cdot 10^{-3} K^{-1}$</i>	<i>Meze použití [°C]</i>
Pt	3,85-3,93	-200 až 850
Ni	6,17-6,70	-60 až 250
Cu	4,26-4,33	-50 až 150

V praxi se pro výpočet hodnoty odporu pro danou teplotu používá aproximační rovnice. Tato rovnice se dá zjednodušit pro malé teplotní rozsahy ($\Delta\vartheta < 100\text{ °C}$) na lineární vztah:

$$R_T = R_0[1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (4.3)$$

Kde:

- R_T – Odpor materiálu při dané teplotě [Ω]
- R_0 – Odpor materiálu při teplotě 0 °C [Ω]
- α – Teplotní součinitel odporu [K^{-1}]
- ϑ, ϑ_0 – Počáteční a koncová teplota materiálu [$^{\circ}\text{C}$]

Z hlediska konstrukce se kovové odporové čidlo obvykle skládá z tenkého kovového drátku, zataveného do keramického nebo skleněného tělesa. Celý tento díl je následně uložen v ochranné trubici a ochranné jímce. (22)

4.2.3 Polovodičové odporové teploměry

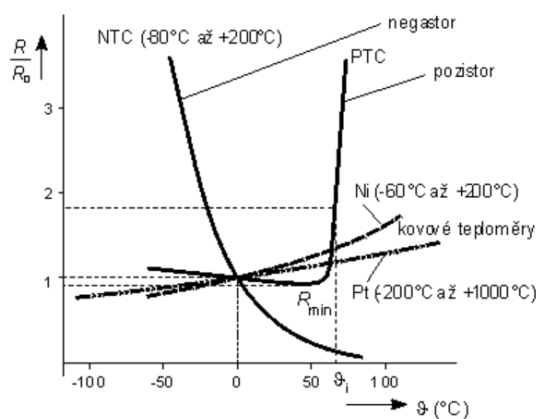
Stejně jako v předchozí kapitole je principem polovodičových odporových teploměrů závislost odporu na teplotě. Vyskytuje se zde ovšem rozdíl v tom, že nemusí mít pouze kladný teplotní součinitel odporu α . Tento druh teploměru obvykle označujeme jako „termistor“ (Thermally sensitive resistor) právě kvůli jeho teplotní odporové závislosti. Obecně dělíme termistory na NTC (Negative temperature coefficient) a PTC (Positive temperature coefficient). Dále řadíme do této skupiny polovodičové monokrystalické senzory teploty. Vyrábí se celá řada termistorů o různých hodnotách odporu, který pokrývá několik řádů ($0,1\Omega$ - $M\Omega$). Dále mají termistory výrazně vyšší teplotní součinitel než kovové teploměry. Jsou velmi citlivé a vhodné i pro měření rychlých změn teploty, problém nastává v jejich stárnutí a dochází tak k nepřesnostem.

○ NTC termistory

Mají nelineární závislost odporu na teplotě a záporný teplotní součinitel odporu. Znamená to, že s rostoucí teplotou dochází ke snižování odporu teploměru. Jsou vyráběny spékáním oxidů jako jsou Fe_2O_3 , TiO_2 , CuO , MnO , NiO , CoO , BaO atd.

○ PTC termistory

Na rozdíl od NTC termistorů mají kladný teplotní součinitel odporu. Obvykle se vyrábějí z polykrystalické feroelektrické keramiky ($BaTiO_3$). Jak je možné vidět na obr (4.3), tento typ termistoru má zvláštní charakteristiku závislosti odporu na teplotě, která má zprvu klesající trend, následně dosáhne minimální hodnoty odporu a začne v úzkém pásmu velmi prudce stoupat. Vzhledem k tvaru této charakteristiky je patrné, že tyto termistory vhodné pro měření v úzkém teplotním intervalu, zejména pak pro signalizační účely. (22)



Obrázek 4.3: Závislost odporu na teplotě pro různé senzory teploty (22)

4.3 Bezdotykové měření teploty

Z fyzikální podstaty vyzařují tělesa, obsahující tepelnou energii, elektromagnetické záření, jež jsme schopni zachytit senzorem. Toto záření nabývá hodnot vlnových délek v rozmezí od 0,4 μm až 25 μm podle toho, kolik tepelné energie vyzařují. Podle svých vlnových délek celé spektrum dělíme na několik částí:

- od 0,4 μm do 0,78 μm – viditelné spektrum
- od 0,78 μm do 1 μm – blízké infračervené spektrum
- od 2 μm do 3 μm – krátkovlnné infračervené spektrum
- od 3 μm do 5 μm – středovlnné infračervené spektrum
- od 5 μm do 25 μm – dlouhovlnné infračervené spektrum

Měřitelné tepelné záření se potom pohybuje v oblasti od 2 μm do 25 μm a pokrývá škálu teplot přibližně od -40 $^{\circ}\text{C}$ do 10000 $^{\circ}\text{C}$.

Použití bezkontaktního měření teploty s sebou přináší celou řadu výhod i nevýhod. Mezi výhody se například řadí fakt, že jsme schopni měřit i pohybující se předměty (rotující), přičemž obvykle měříme z dostatečně bezpečné vzdálenosti. Další výhodou je, že tento druh měření teploty zvládá i velmi dynamické teplotní děje a dokáže naměřené hodnoty dále číslicově zpracovávat. Mezi nevýhody tohoto měření patří například celkem vysoká znalost problematiky, aby bylo totiž měření provedeno správně, je nutné nastavit na měřicím zařízení vhodnou emisivitu povrchu měřeného tělesa a vhodnou hodnotu prostupnosti prostředí mezi měřicím zařízením a měřeným objektem. Dalším nedostatkem může být vliv okolí na měřenou úlohu. (25)

4.3.1 Termovizní systémy

Mezi nejpoužívanější systémy pro bezkontaktní měření patří termovize. Ta má jedinečnou schopnost nejen měřit teplotu daného objektu, a to velmi přesně (až s přesností 0,1 $^{\circ}\text{C}$), ale i vykreslit celé teplotní pole daného objektu, což nám umožňuje sledovat konkrétní části měřeného objektu a zkoumat vývoj jeho teplotního pole. Jedná se o poměrně nákladné zařízení, i přesto se ale využívá napříč celým průmyslem, zdravotnictvím, stavebnictvím atd. Kamery se obvykle dělí dle použitého detektoru a dokážou vykreslit barevné (každá barva reprezentuje jinou teplotu) nebo černobílé spektrum pro identifikaci jednotlivých teplot. (25)

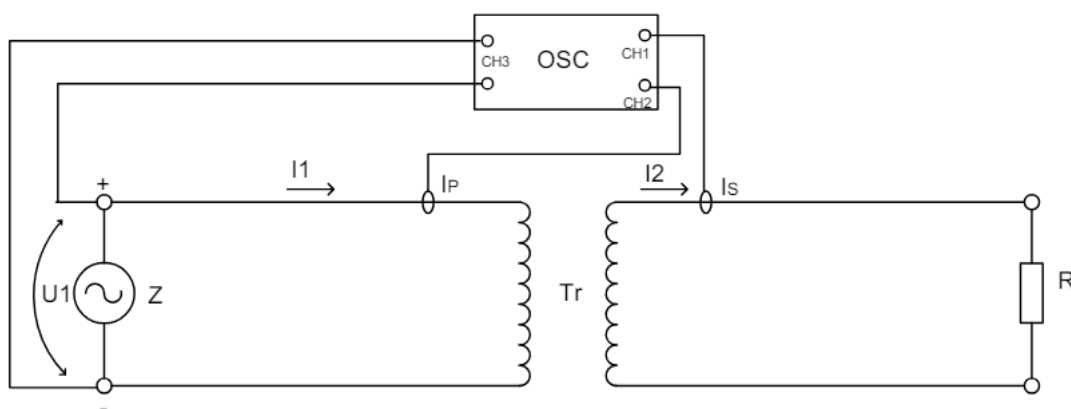
5 Návrh a realizace testovacího obvodu pro silnoproudé generování zkušebního proudu pomocí proudového transformátoru.

Smyslem této práce je vytvořit zkušební obvod, jež bude simulovat průtok elektrického proudu závitem střídavého asynchronního stroje. Myšlenkou je zjistit, zda se části závitu, jež jsou zahnuté (špička čela vinutí nebo ohyb mezi čelem a stranou vinutí), ohřívají do určité míry více než části rovné. Nejprve je ale zapotřebí sestavit měřící obvod, na němž bude možné měření provést.

5.1 Měřící sestava pro tvorbu kalibračních křivek

Pro potřebu následujícího měření byla pro tuto práci sestrojena měřící sestava pro měření oteplení závitu vinutí asynchronního stroje. Tato sestava byla původně využita pro měření zkušebního prvku, díky kterému jsme mohli změřit vstupní a výstupní veličiny a následně z nich sestrojit kalibrační křivky. Pro toto měření byly využity tři zkušební vzorky, aby bylo měření podloženo.

5.1.1 Schéma zapojení měřící sestavy pro tvorbu kalibračních křivek



Obrázek 5.1: Schéma zapojení pro měření kalibračních křivek

Jak je patrné z obr. (5.1), schéma se skládá z několika dílčích částí. Na vstupu je umístěn regulovatelný zdroj pro nastavení požadovaných hodnot napětí mezi vstupními svorkami. Zdroj je přímo připojený na proudový transformátor, který má za úkol změnit poměr veličin v obvodu tak, abychom dosáhli požadované velikosti proudu na sekundární straně. Pro zachování schematického značení je ve schématu sekundární strana vyobrazena několika závitů. Ve skutečnosti je ale sekundární strana reprezentována pouze jediným závitem, a to

testovacím vzorkem. Ten zde zastupuje celou sekundární stranu, neboť chceme, aby zvýšení proudu na sekundární straně bylo co nejvyšší a docházelo tak ke snadnému ohřátí testovaného prvku. Právě tento prvek je ve schématu realizován jako odpor, neboť pro naši práci nemá jiná jeho veličina význam. V poslední řadě je zde jako měřicí zařízení umístěn osciloskop. Pro měření jsme využili 3 kanály osciloskopu, a to jeden napěťový a dva proudové. Napěťový kanál měří velikost vstupního napětí, slouží jako kontrola toho, zda je v obvodu opravdu požadované napětí. Proudové kanály poté měří proud na primární a sekundární straně obvodu.

5.1.2 Použité přístroje pro měření kalibračních křivek

Tabulka 5.1: Tabulka použitých přístrojů

Označení ve schématu	Typ přístroje	Výrobce	Druh	Inventární číslo	Rozsah
Z	Zdroj	TPW	RFT (Toroidal core transformer)	21683487	0-250 V (0-12 A)
OSC	Osciloskop	LeCroy	WavePRO 7300 A	500856	1-3 GHz
I_p	Proudové měřicí kleště	LeCroy	AP015	922254	0-30 A (50 A peak)
I_s	Proudové měřicí kleště	LeCroy	CP500	902251	0-500 A (700 A peak)
Tr	Proudový transformátor	VUEP Brno	1000VA	201145	1000VA

5.1.3 Tvorba kalibrační křivky

Jedním z bodů zadání a velmi důležitým prvkem práce je tvorba kalibračních křivek celé sestavy. Kalibrační křivka v tomto případě vynáší závislost velikosti sekundárního proudu na vstupním (primárním) napětí vstupujícím do obvodu ze zdroje.

$$I_{OUT} = f(U_{inp}) \quad (5.1)$$

Vyjádření závislosti výstupního proudu na vstupním napětí nám popíše chování měřicí sestavy. Jsme díky nim schopni přibližně odhadnout hodnoty elektrických veličin, které lze v sestavě očekávat v následujícím měření teploty vzorku. Aby byly kalibrační křivky spolehlivé, provedli jsme měření na třech podobných vzorcích, pro zajištění co nejvyšší přesnosti. U kalibračních křivek přístrojů tohoto typu lze očekávat lineární závislost vstupního napětí na výstupním proudu. To znamená, že se zvyšujícím se primárním napětí dochází ke zvýšení proudu na sekundární straně měřicí sestavy.

5.1.4 Postup měření kalibračních křivek

Pro tvorbu kalibračních křivek bylo zapotřebí sestavit soustavu tak, abychom byli schopni měřit vstupní napětí na primární straně a proud protékající vzorkem (sekundární stranou).

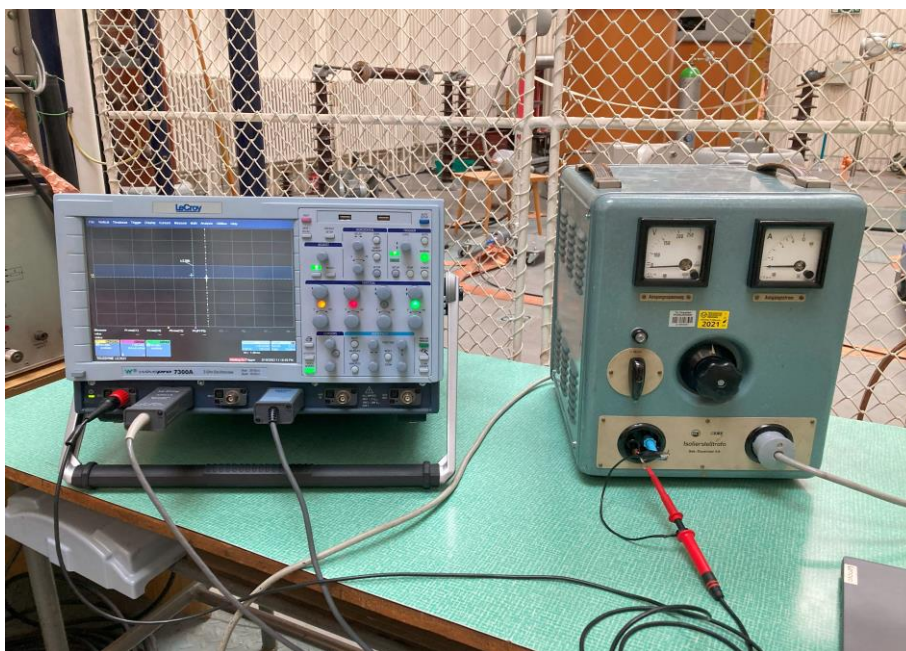
Jako první jsme připojili do sítě regulovatelný zdroj značky TPW s toroidním jádrem s rozsahem 0-250 V primárního napětí. Zdroj je přímo připojen na proudový transformátor, jež mění poměry v soustavě mezi primární a sekundární stranou. Sekundární strana je v tomto obvodu tvořena pouze vzorkem pro měření kalibračních křivek. Dá se tedy říct, že je sekundární strana tvořena pouze jedním závitem spojeným na krátko, jež reprezentuje celou zátěž.

Následně je potřeba do obvodu zapojit měřicí zařízení. Pro tuto potřebu byl využit osciloskop značky LeCroy se šesti vstupními kanály. Pro naši potřebu jsme využili tři měřicí kanály, a to jeden napěťový a dva proudové. Použitý zdroj má dva výstupy, jeden jsme využili pro napájení transformátoru, jak již bylo zmíněno. Druhý výstup je s prvním paralelně propojený, a proto byl využit pro měření napětí, jež je připojeno k transformátoru. Právě na tento výstup je připojena napěťová sonda. Napětí na primární straně nastavujeme přímo na zdroji, ovšem ze stupnice zdroje nejsou k dispozici přesné údaje napětí na primární straně, a proto zde slouží napěťová sonda jako přesnější zdroj údajů. Dále je do obvodu připojena proudová sonda, jak pro měření hodnoty primárního proudu, tak pro měření hodnoty proudu sekundárního. Pro měření primárního proudu jsme použili kleště značky LeCroy s rozsahem 0-30 A, jelikož jsme neočekávali vyšší hodnoty primárního proudu. Kleště této sondy byly připojeny těsně před transformátor na přívodní vodič. Pro měření sekundárního proudu jsme využili také měřicí kleště značky LeCroy ovšem s rozsahem 0-500 A, jelikož proud sekundární strany bude dosahovat mnohem větších hodnot. Tyto kleště byly poté umístěny přímo na měřený vzorek. Právě z důvodu velmi blízkého kontaktu těchto kleští se vzorkem, muselo být měření kalibračních křivek prováděno velmi rychle, neboť docházelo k ohřívání vzorku, a tím by mohlo dojít k porušení těchto měřicích kleští.

Posledním prvkem soustavy je samotný měřený prvek. Ten byl vytvořen z měděné pásoviny o rozměrech 1x2 cm a celkové vodivé délce jeden metr. Pásovina byla ohnuta a spojena tak aby simulovala závit. Tento závit byl poté provlečen transformátorem, aby docházelo k elektrické indukci a byl umístěn a přichycen na izolátor z důvodu bezpečnosti stability a přesnosti měření.

5.1.5 Dokumentace měření kalibračních křivek

Na obr. (5.2) můžeme vidět na levé straně použitý osciloskop pro měření veličin potřebných k tvorbě kalibračních křivek. V pravé části obrázku se poté nachází regulovatelný zdroj, který je v zadní části připojen do sítě. Je zde patrné využití tří kanálů osciloskopu, přičemž levý kanál s napěťovou sondou je připojen přímo na jeden z výstupů zdroje. Druhý z výstupů poté vede přímo na proudový transformátor.



Obrázek 5.2: Část sestavy pro měření kalibračních křivek – zdroj, osciloskop



Obrázek 5.3: Část sestavy pro tvorbu kalibračních křivek – proudové měřící kleště

Na obr. (5.3) je znázorněno připojení proudových měřicích kleští. Jak již bylo zmíněno, měřicí kleště proudu primární strany jsou připojeny na vodiči vedoucím ze zdroje do transformátoru, a to konkrétně přímo na vstupu do transformátoru. Kleště měřící sekundární proud jsou poté umístěny přímo na měřeném vzorku pro tvorbu kalibračních křivek.



Obrázek 5.4: Část sestavy pro měření kalibračních křivek – umístění vzorku na izolátoru

Poslední část sestavy nám znázorňuje umístění měřeného vzorku na izolátor. Dále je z obrázku patrné jeho protažení transformátorem a spojení tak, aby tvořil závit protékající proudem.

5.1.6 Naměřené hodnoty kalibračních křivek

Pro správnost měření jsme nastavovali hodnoty napětí na zdroji s krokem 2 V. První nastavenou hodnotou byla hodnota 4 V, a takto jsme pokračovali až do hodnoty 26 V. Tento krok a rozsah měření byl zvolen na základě předpokládaných hodnot proudu v sekundární části obvodu, kde jsme byli omezeni rozsahem měřicích kleští do 500 A.

Z osciloskopu jsme měřené hodnoty přepisovaly do tabulek, ze kterých byly následně vytvořeny kalibrační křivky. Hodnoty na ose „y“ reprezentují naměřené hodnoty sekundárních proudů, zatímco hodnoty na ose „x“ reprezentují nastavené napětí na zdroji (primární straně).

Tabulka 5.2: Naměřené hodnoty kalibrační křivky pro první vzorek

U1[V]	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
I1[A]	0,224	0,435	0,619	0,834	0,979	1,00	1,25	1,5	1,7	1,8	1,9	2,2
I2[A]	66,4	113,8	153,7	201,3	236	255	294	344	385	411	446	488

Tabulka 5.3: Naměřené hodnoty kalibrační křivky pro druhý vzorek

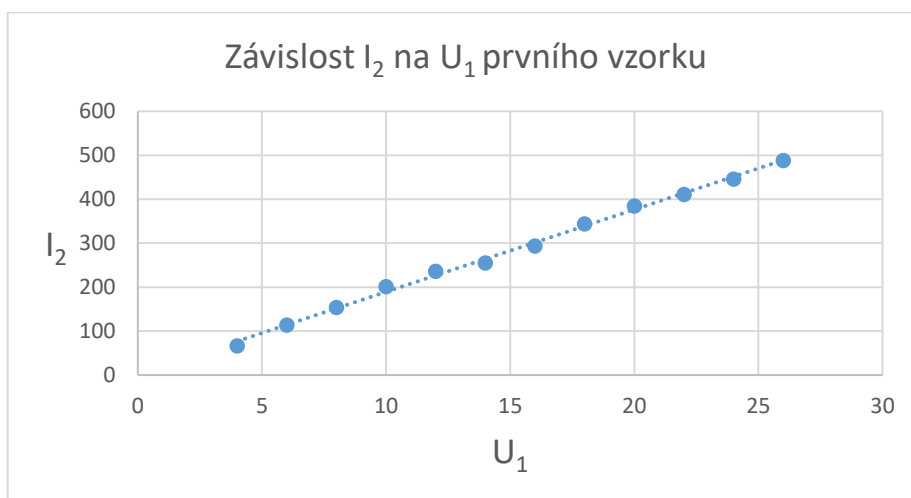
U1[V]	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
I1[A]	0,255	0,457	0,619	0,848	1,048	1,00	1,31	1,56	1,70	1,85	1,98	2,27
I2[A]	67,0	116,8	156,1	203,3	236	255	297	346	388	413	446	489

Tabulka 5.4: Naměřené hodnoty kalibrační křivky pro třetí vzorek

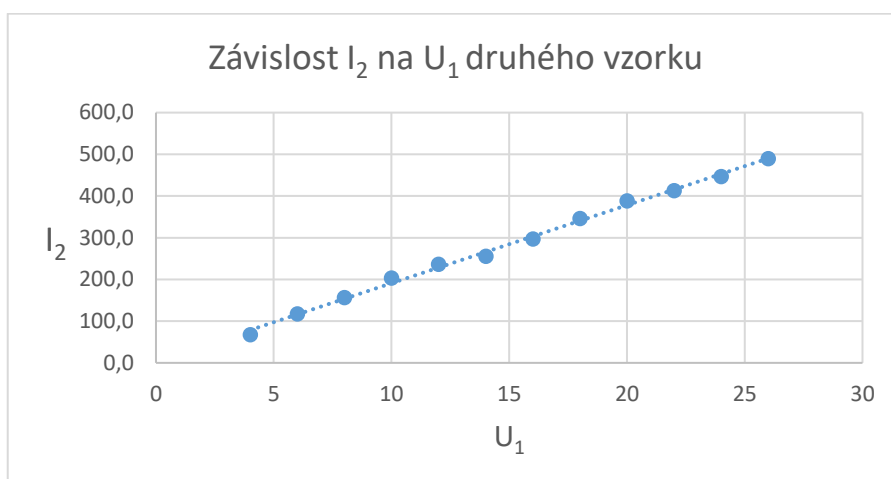
U1[V]	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
I1[A]	0,322	0,482	0,697	0,862	1,120	1,02	1,36	1,57	1,71	1,91	2,03	2,29
I2[A]	68,7	118,5	157,8	204,3	237	257	299	349	388	413	447	491

5.1.7 Kalibrační křivky

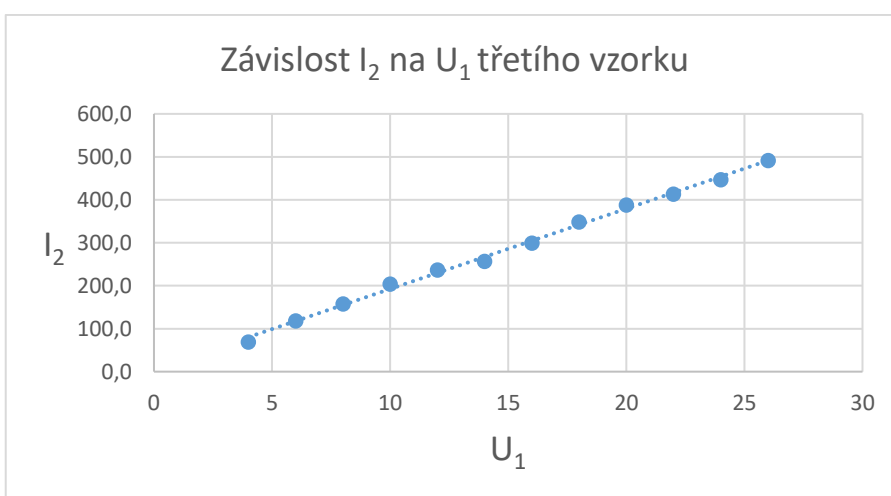
Kalibrační křivky patrné v následujících grafech splňují na první pohled očekávání. Grafy vyšly téměř lineárně, jak jsme očekávali. Můžeme tedy soudit, že se skutečně se zvětšováním hodnoty primárního napětí zvyšuje i hodnota proudu protékajícího měřeným prvkem. V tabulkách je patrné, že se hodnoty měření pro jednotlivé prvky liší jen minimálně, zatímco v grafické podobě jsou kalibrační křivky téměř identické. To poukazuje na velkou podobnost vzorků, které byly vytvořeny původně z jednoho kusu materiálu, a mají tak velmi podobné fyzikální vlastnosti. Drobná nelinearita měření může být způsobena vlivem nepřesnosti měření. Například únikem části indukčního toku mimo měřicí kleště. Dalším důležitým aspektem na nepřesnost měření je offset, který jsme detekovali na měřicích kleštích sekundárního proudu. Tyto kleště totiž měřili nepatrnou hodnotu i přesto, že nebyly vůbec připojeny v obvodu. Hodnota tohoto offsetu činila přibližně 1.1 A. Tato hodnota by v kontextu měření neměla hrát nijak velkou roli. Při měření sekundárního proudu se pohybujeme v desítkách až stovkách ampér, a proto by změna o tento malý offset výsledky ovlivnit neměla. Dalším drobnou nepřesností je vliv oteplení vzorku během měření. Jak již bylo zmíněno, měření se provádělo co nejrychleji, aby nebylo ovlivněno oteplením vzorku. Oteplení ale úplně zabránit nelze, a jak již víme z kapitoly o ohřevu vodiče protékajícího proudem, se zvyšující se teplotou roste i odpor vzorku. Tento jev je patrný i v tabulkách, kde se rozdíl mezi po sobě následujícími proudy liší i přes to, že krok nastavovaného napětí se neliší vůbec.



Graf 5.1: Kalibrační křivka pro první vzorek



Graf 5.2: Kalibrační křivka pro druhý vzorek



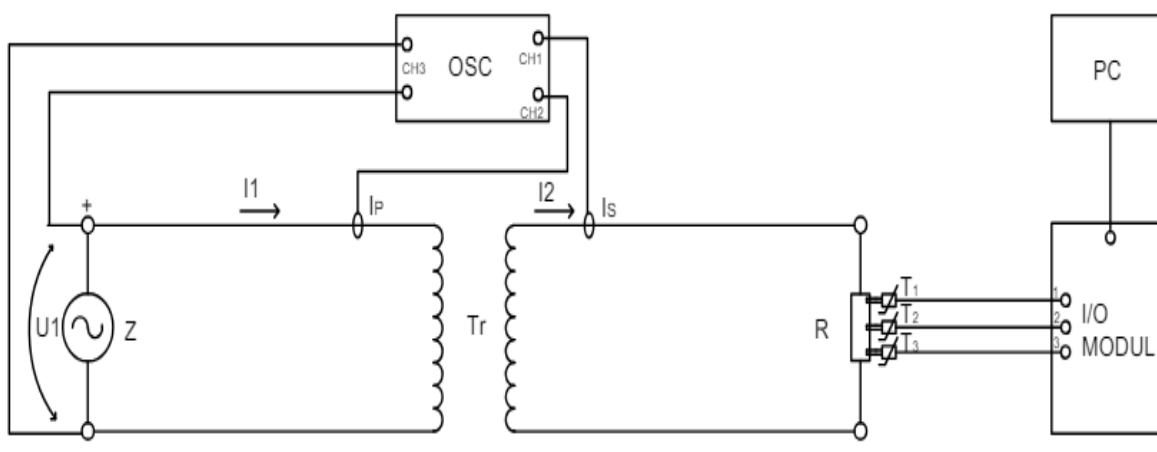
Graf 5.3: Kalibrační křivka pro třetí vzorek

5.2 Měření oteplení na vzorku (modelu) vinutí.

Základním pilířem této práce je měření oteplení na konkrétním vzorku vinutí. Konkrétně se snažíme sledovat teplotu určitých míst modelu se snahou zjistit, zda jsou teploty v těchto bodech identické či nikoliv. Použité snímače teploty jsou totiž umístěny jak do rovne části vzorku, tak do částí, které rovne nejsou. Snímač je tedy umístěn v ohybu. Pokud by se opravdu prokázalo, že ohnuté části vinutí se ohřívají jinak (více) než části rovne, vedlo by to na úvahu dimenzovat izolaci těchto míst na vyšší teplotu nebo užít jiný druh izolace s větší teplotní odolností (izolaci vyšší řady). Ohyby závitu by se jinak dali považovat z hlediska izolace za slabá místa.

5.2.1 Měřicí sestava pro měření teploty modelu vinutí.

Pro potřebu měření oteplení vzorku jsme opět sestrojili měřicí sestavu, ze které jsme následně sbírali data pro vyhodnocení. Měřicí sestava se příliš neliší od té, jež jsme využívali pro tvorbu kalibračních křivek.



Obrázek 5.5: Schéma měřicí sestavy pro měření oteplení vzorku vinutí

Jak je patrné z obr. (5.5) jádro měřicí sestavy zůstává stejné. K měření je opět využito regulovatelného zdroje, který napájí proudový transformátor, jež mění poměry elektrických fyzikálních veličin mezi primární a sekundární stranou. K měření je opět využito osciloskopu pro měření napětí zdroje a měření proudů primární a sekundární strany. Nově se ovšem ve schématu vyskytuje část pro měření oteplení vzorku. Ta je reprezentována měřicími čidly, která jsou zakomponována do měřicího vzorku. Vodiče vedoucí od teplotních měřidel poté směřují do teplotního vstupního modulu značky National

instruments. Tento modul je vložen v kontroléru stejné značky, jež umožňuje zpracování analogových signálů přijímaných z měřících čidel do digitální podoby, abychom byli schopni hodnoty dále zaznamenávat a zpracovávat v počítači.

Tabulka 5.5: Použité přístroje v sestavě pro měření teploty vzorku

Označení ve schématu	Typ přístroje	Výrobce	Druh	Inventární číslo	Rozsah
Z	Zdroj	TPW	RFT (Toroidal core transformer)	21683487	0-250 V (0-12 A)
OSC	Osciloskop	LeCroy	WavePRO 7300 A	500856	1-3 GHz
I_p	Proudové měřící kleště	LeCroy	AP015	922254	0-30 A (50 A peak)
I_s	Proudové měřící kleště	LeCroy	CP1000	902385	0-1000 A (1300 A peak)
Tr	Proudový transformátor	VUEP Brno	1000VA	201145	1000VA
T_1-T_3	Teplotní čidlo	JSP	K	11149071	-200-1200 °C
I/O Modul	Kontrolér	National instruments	NI cRIO- 9053	471935	----- -----
----- -----	Teplotní vstupní modul	National instruments	NI-9214	195969	ˆ-100-1100 °C

5.2.2 Software a hardware použitý pro měření teploty

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, pro měření teploty vzorku bylo využito komponentů značky National instruments. Tato společnost vyrábí celou řadu komponent v oblasti testování a měření různých prvků a veličin. V této práci bylo využito standartního systému DAQ (data acquisition), který se obvykle skládá ze senzorů, hardwaru pro měření a počítače s programovatelným softwarem.

Kontrolér

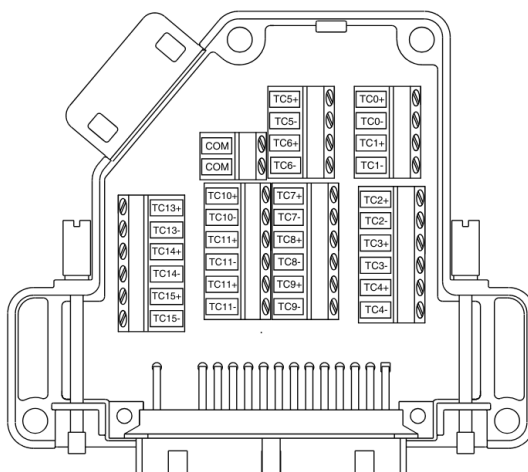
Tento modul (kontrolér) se skládá ze šasi, na kterém je umístěn procesor pro spouštění aplikace LabView Real-Time. Nabízí vícerychlostní řízení trasování, záznam dat a komunikaci mezi počítačem a měřícím čidlem.



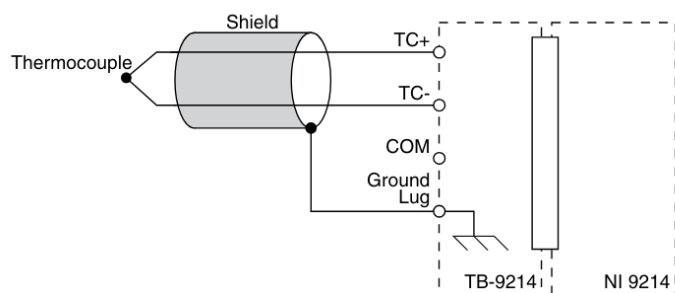
Obrázek 5.6: Kontrolér značky National instruments (26)

I/O modul

Do kontroléru na obr. (5.6) se následně umístí I/O modul, který obsahuje izolační a konverzní obvody pro úpravu signálu a je kompatibilní s různými druhy průmyslových senzorů. Výhodou těchto modelů je jejich malá velikost. Námí využitý modul má celkem 15 měřicích kanálů, ke kterým jsou senzory připojeny. V našem případě byly využity tři kanály.



Obrázek 5.7: Vnitřní dispozice I/O modulu (26)



Obrázek 5.8: Připojení senzoru k I/O modulu (26)

Mezi kladně a záporně označený typ kanálu (např TC 13+ a TC 13-) se umísťuje měřicí senzor viz následující obr. (5.8).

Teplotní senzory

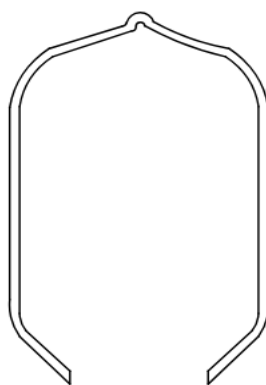
Pro měření bylo využito plášťového termoelektrického snímače teploty s napojeným kompenzačním vedením. Jedná se termočlánek s označením 1 x K (NiCr-NiAl) s materiálem pláště Inconel 600 o měřicím rozsahu -200 až + 1200 °C. Průměr stonku činí 0,5 mm.

Software LabView

Je grafické vývojové prostředí umožňující konfigurovat a vyvíjet různé měřicí a řídicí systémy. Využívá grafického programování, což znamená, že místo klasického psaní kódu se v programu LabView skládají ikony vykonávající určité úlohy výsledného programu. Jeho největší výhodou je dobrá kompatibilita s různými I/O moduly. Jak bylo zmíněno, jedná se o software použitelný pro celou řadu problematik, a proto je jeho další velkou výhodou rozsah knihoven tohoto programu. Pro naši potřebu v něm bylo vytvořeno prostředí pro měření teploty.

5.2.3 Příprava měřeného vzorku vinutí

Nyní, když jsme si představili sestavu použitou k měření teploty modelu vinutí, je dále nutné detailně zmínit samotný vzorek, na kterém bylo měření prováděno. Vzorek byl vyňat z vyřazeného asynchronního motoru a před použitím pro měření musel podstoupit několik úprav. Původní podoba vzorku je patrná na obr. (5.9).

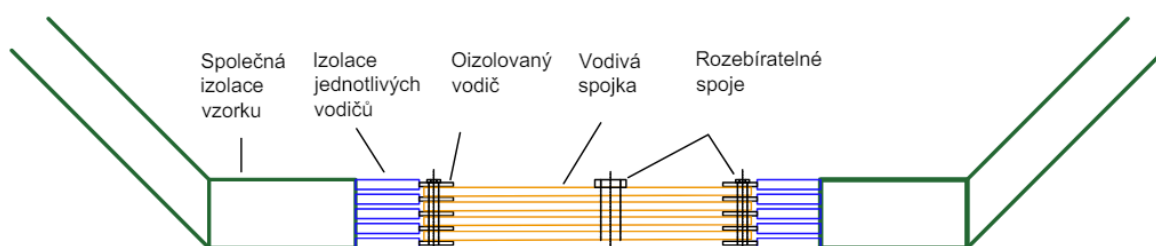


Obrázek 5.9: Náčrt měřeného vzorku před úpravami

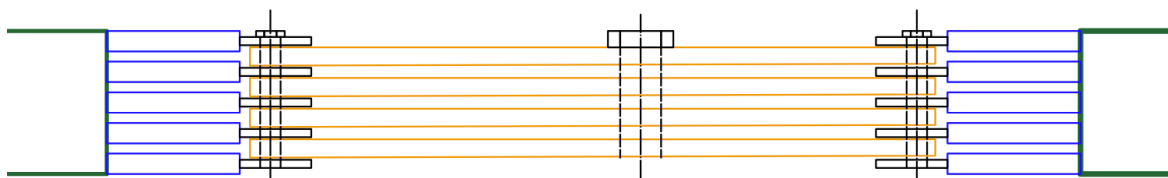
Vzorek (závit) se skládá z 5 jednotlivých vodičů, které jsou vzájemně izolovány, a navíc mají ještě společnou vnější izolaci. Cílem práce je ohřát tento vzorek na teplotu 200 °C

nebo mírně vyšší. Tato teplota nebyla zvolena náhodou, jedná se totiž o teplotu, jakou by měla izolace stroje snést, aniž by došlo k předčasné degradaci izolačního systému. Tato teplota tedy odpovídá třídě izolace N (viz. Kap. 2.2). Jak je z náčrtu vzorku patrné, v tomto stavu netvoří uzavřený obvod (uzavřenou sekundární stranu sestavy). Proto bylo nutné vzorek patřičně upravit, aby bylo jeho použití pro měření jeho oteplení možné.

První úpravou bylo odstranění společné izolace a izolace jednotlivých vodičů v dolní části závitu tak, abychom byli schopni vytvořit vodivé spojení mezi oběma cívkovými stranami závitu. Toto vodivé spojení totiž zajistí právě zmiňované uzavření sekundární části sestavy. Po odstranění izolace jsme z měděné pásoviny vytvořili 4 identické vodivé destičky. Následně jsme od sebe mírně oddělili jednotlivé vodiče závitu a námi vytvořené vodivé destičky jsme co nejpřesněji vkládali mezi ně. Poté jsme vrtáním vytvořili na obou stranách závitu i vodivých spojek díru a pomocí šroubů jsme vytvořili rozebíratelný spoj tak, aby konstrukční části byly co nejpevněji spojeny. Další rozebíratelný spoj tvořený šroubem byl umístěn v pravé části vodivého spojení obou cívkových stran. Spoj je zde umístěn z toho důvodu, abychom mohli opět bezpečně přichytit měřený vzorek na izolátor.

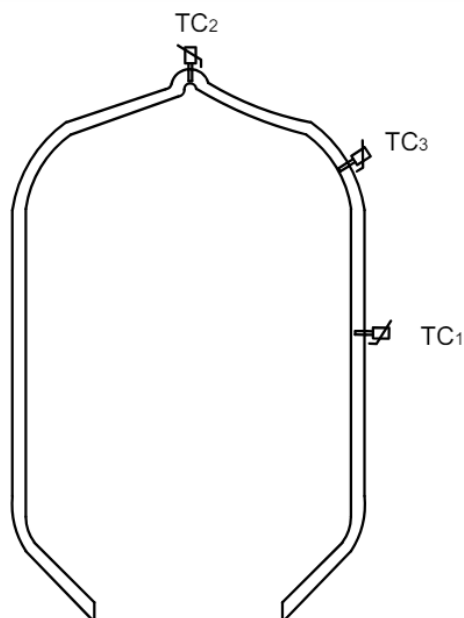


Obrázek 5.10: Výkres úpravy vzorku



Obrázek 5.11: Detail vodivého spojení

Poslední úpravou, kterou musel vzorek projít před tím, než bylo možné začít měřit, bylo vyvrtání samotných otvorů pro senzory teploty. Aby bylo měření co nejpřesnější, bylo třeba vyvrtat díry do materiálu velmi tenkým vrtákem o průměru 1,5 mm. V tomto případě jsme vrt provedli, jak skrze izolaci, tak skrze vodivý materiál vzorku uvnitř. Jinými slovy jsme v těchto místech neodstraňovali izolaci, abychom příliš neovlivnili výsledky měření. Jak již bylo zmíněno, cílem práce je odhalit, zda se vzorek ohřívá více v zahnutých částech nebo v částech rovných. Rozhodli jsme se tedy do vzorku umístit konkrétně tři senzory teploty. Dva jsou umístěny v zahnutých částech vzorku, a to konkrétně do špičky čela vinutí a do ohybu mezi čelem a cívkovou stranou. Poslední měřicí sensor byl umístěn do rovné části vzorku, konkrétně doprostřed cívkové strany. Umístění všech senzorů teploty je patrné z obr. (5.11).



Obrázek 5.12: Umístění senzorů teploty ve vzorku

5.2.4 Postup měření a dokumentace měřicí sestavy

Před začátkem měření jsme se rozhodli volit průběh proudu měřeným vzorkem dle primární strany a to tak, že budeme nastavovat hodnotu primárního proudu od 2 A do 5 A s krokem jeden ampér. Po připojení veškerých komponent dle schématu a spuštění všech použitých přístrojů, jsme na regulovatelném zdroji nastavili požadovanou hodnotu primárního proudu, jež byl měřen osciloskopem. Například při prvním měření jsme tedy nastavili hodnotu primárního proudu 2 A. Přesné nastavení proudu bylo vzhledem k citlivosti zdroje velmi obtížné. Snažili jsme se tedy přesné hodnotě alespoň co nejtěsněji

přiblížit. Víme, že nám osciloskop zobrazuje $\frac{2 \text{ mV}}{1 \text{ A}}$ sekundárního proudu. Vzhledem k tomu, že sekundární hodnotu napětí měříme osciloskopem, jsme díky tomuto převodu schopni spočítat, jaká hodnota proudu nám protéká sekundární částí závitu. Například v prvním měření nám osciloskop signalizoval hodnotu 1 V sekundárního napětí. Z výše zmíněného vzorce jsme tedy schopni spočítat velikost sekundárního proudu jako:

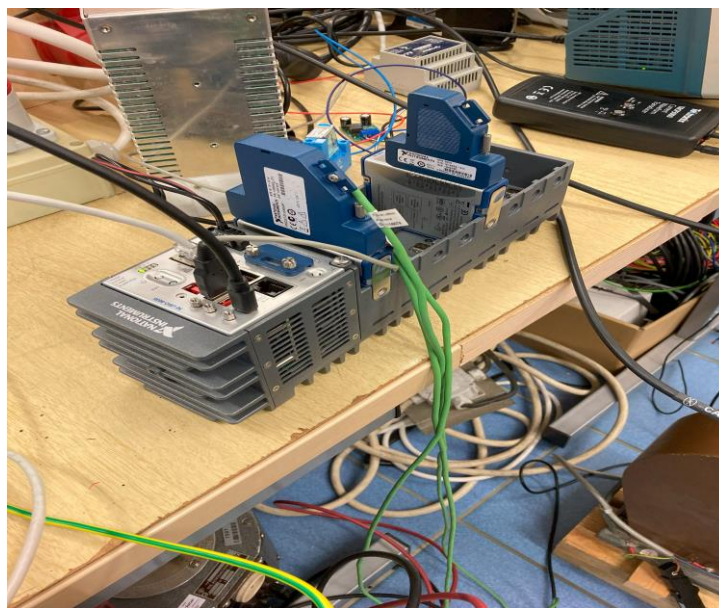
$$I_2 = \frac{U_2}{2 \text{ mV}} = \frac{1}{0,002} = 500 \text{ A} \quad (5.2)$$

Stejným vzorcem jsme stanovili hodnoty sekundárních proudů všech měření. Nyní, když nám začal systémem protékat proud, v softwaru Labview začíná být patrné zvyšování teploty. Teplotu vinutí vzorkujeme po 250 ms. Doba měření teploty není pro všechna hladiny sekundárního proudu stejná, jelikož jsme s měřením skončili až tehdy, kdy teplota dosáhla ustáleného stavu. Doba měření má tedy klesající trend, jelikož s rostoucím sekundárním proudem docházelo k dosažení větších teplot a zároveň k jejich rychlejšímu náběhu. Při dosažení ustáleného stavu jsme si pořídili snímek obrazovky osciloskopu pro vyobrazení průběhů elektrických veličin systému a uložili jsme si zaznamenané teploty, ze kterých jsme následně vytvořili grafy.

Před začátkem dalšího měření bylo potřeba nechat vzorek vychladnout na pokojovou teplotu, aby nedošlo k ovlivnění tohoto měření. Následně jsme nastavili další hodnotu primárního proudu, tedy 3 A a celý postup jsme opakovali.



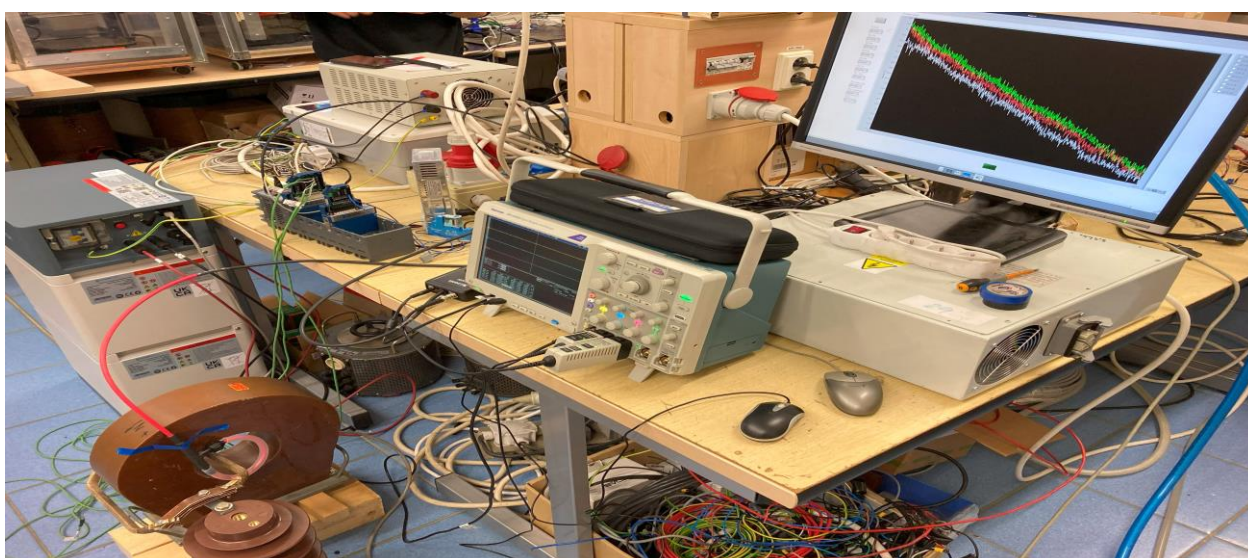
Obrázek 5.13: Ukázka vzorku po provedení úprav



Obrázek 5.14: Ukázka teplotního měřicího systému



Obrázek 5.15: Ukázka umístění vzorku v transformátoru a umístění teplotních senzorů



Obrázek 5.16: Ukázka celé měřicí sestavy

6 Teplotní průběhy měřeného vzorku

Poslední kapitolou této práce zhodnotíme výsledky měření oteplení vzorku procházeného elektrickým proudem. Jak již bylo zmíněno, teplota byla vzorkována po 250 ms, což vede ke skutečnosti, že grafy obsahují velké množství hodnot. Zároveň je rozdíl teplot, které měří jednotlivé senzory obvykle příliš malý na to, abychom z celkového grafu viděli rozdíly v ustáleném teplotním stavu. Proto bude v následujících podkapitolách vždy vložen graf průběhu celého měření, abychom si vytvořili představu, jak tento průběh vypadá a dále bude vložen graf s detailem ustáleného stavu tak, aby byly rozdíly měřených hodnot patrné. Dále bude ke každému měření přiložen i záznam z obrazovky osciloskopu abychom viděli všechny měřené veličiny.

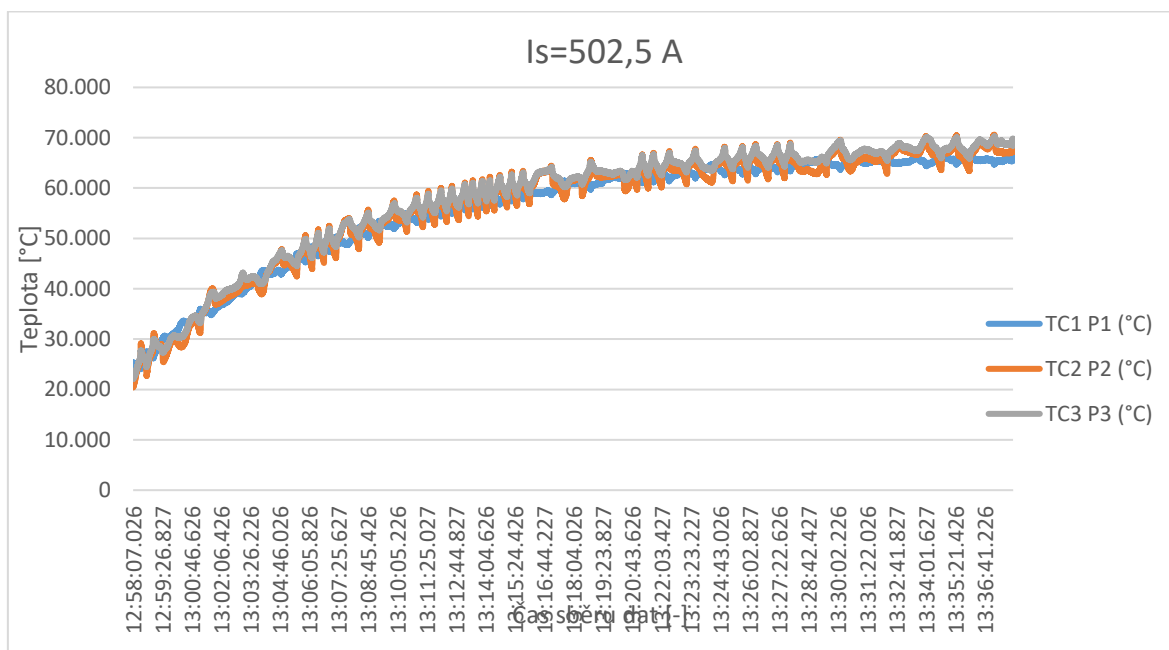
Veškeré naměřené hodnoty byly zaznamenávány použitým softwarem do tabulek a následně vyexportovány do programu excel. Tabulky samy o sobě nejsou příliš vypovídající, a proto nebudou dále do práce vkládány ke každému měření. Abychom měli alespoň představu, jakým způsobem docházelo k ukládání dat, část jedné z vytvořených tabulek si uvedeme nyní.

Tabulka 6.1: Ukázka zaznamenaných hodnot z měření

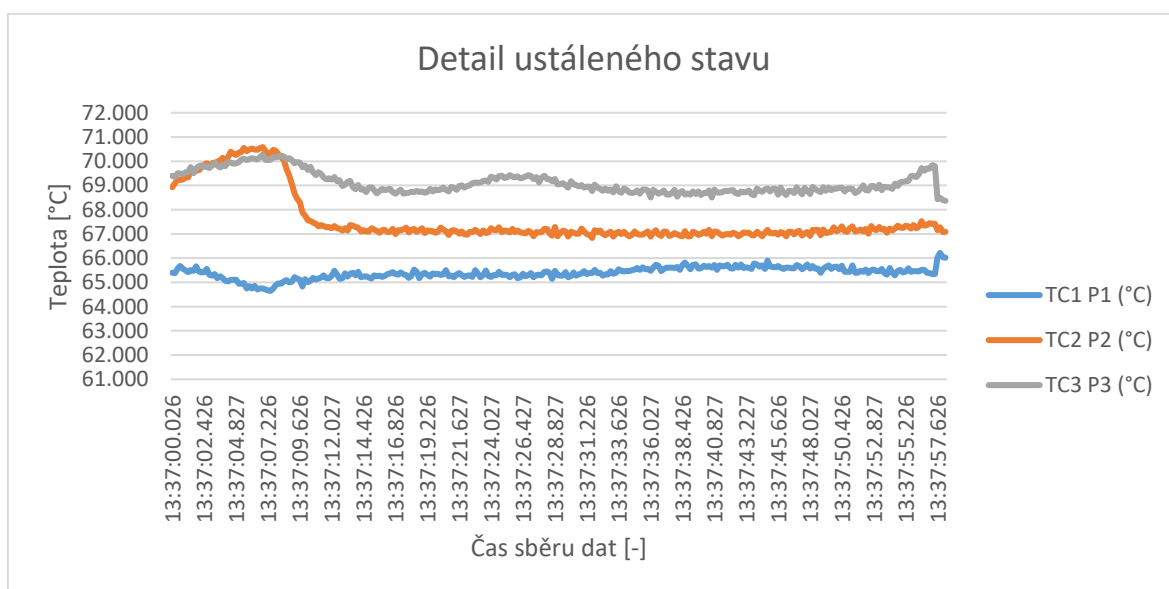
Čas	TC1 P1 (°C)	TC2 P2 (°C)	TC3 P3 (°C)
12:58:07.026	25.164	20.515	22.267
12:58:07.227	25.314	20.599	22.153
12:58:07.426	25.273	20.623	22.095
12:58:07.626	25.232	20.414	22.178
12:58:07.826	25.267	20.721	22.237
12:58:08.026	25.272	20.739	22.468
12:58:08.227	25.267	20.744	22.402
12:58:08.426	25.236	20.914	22.301
12:58:08.627	25.339	20.777	22.476
12:58:08.826	25.272	20.946	22.398
12:58:09.027	25.274	21.057	22.495
12:58:09.226	25.100	20.896	22.495
12:58:09.427	25.055	21.024	22.479
12:58:09.626	24.990	21.134	22.571
12:58:09.826	25.132	21.333	22.568
12:58:10.027	24.911	21.203	22.616
12:58:10.226	24.731	21.089	22.521
12:58:10.427	24.704	21.316	22.610
12:58:10.626	24.805	21.370	22.712
12:58:10.827	24.740	21.527	22.757

6.1 První měření $I_s = 502,5$ A

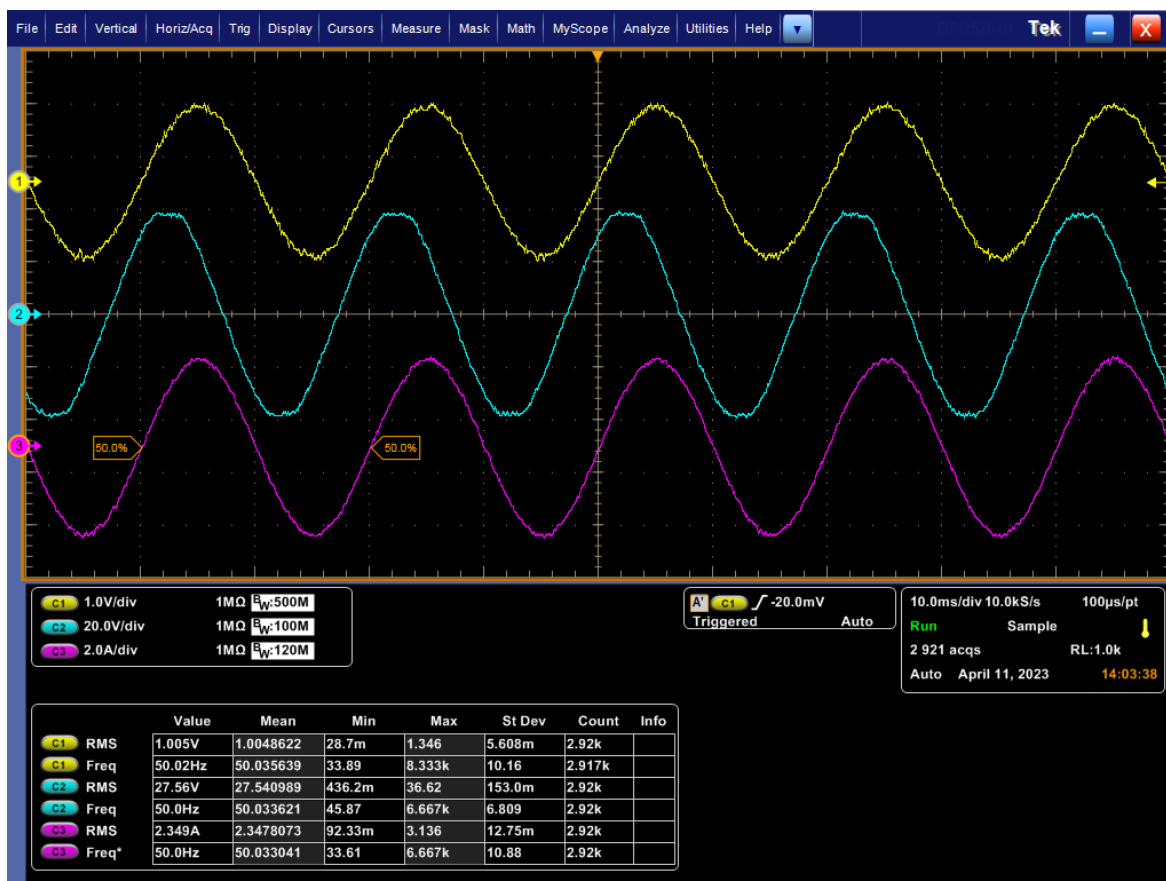
Při prvním měření byla požadovaná nastavená hodnota primárního proudu 2 A. Vzhledem k citlivosti zdroje se nám nejlépe podařilo nastavit na hodnotu 2,349 A čemuž odpovídá sekundární napětí 1,005 V. Dle vztahu (5.2) tomuto napětí odpovídá hodnota sekundárního proudu $I_s = 502,5$ A. Začátek měření proběhl ve 13:57 a test byl ukončen v 14:37. Doba, kdy vzorek dosáhl ustálené teploty byla tedy 40 minut.



Graf 6.1: Průběh měření teploty prvního vzorku



Graf 6.2: Detailní ukázka ustáleného stavu prvního vzorku

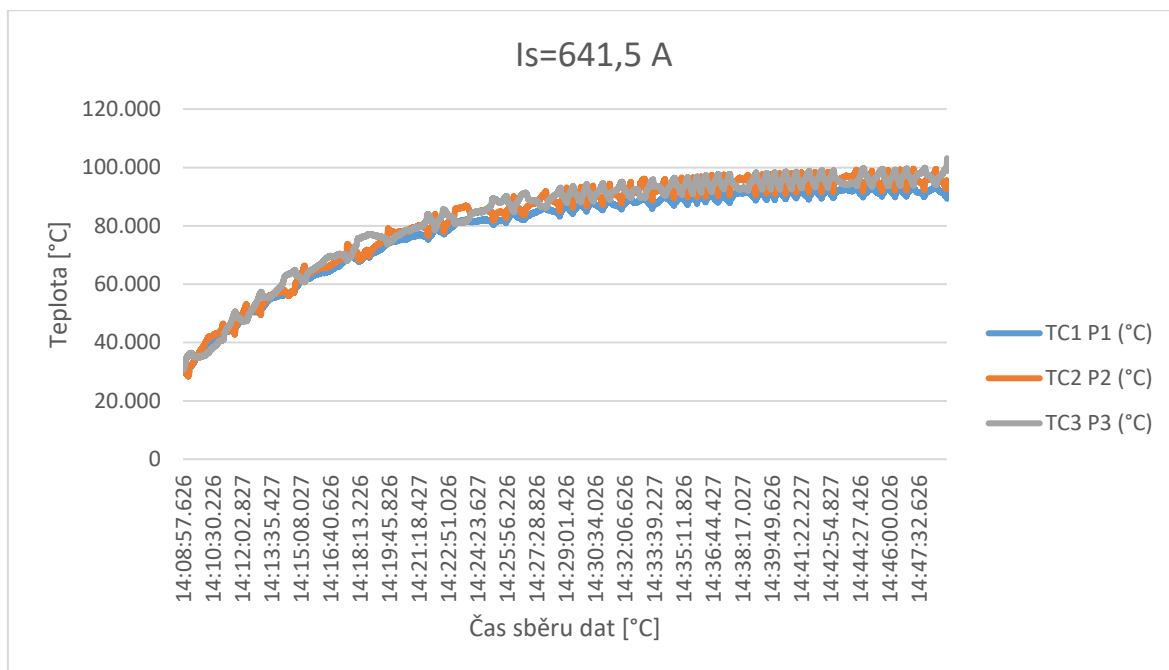


Obrázek 6.1: Záznam obrazovky osciloskopu pro první měření

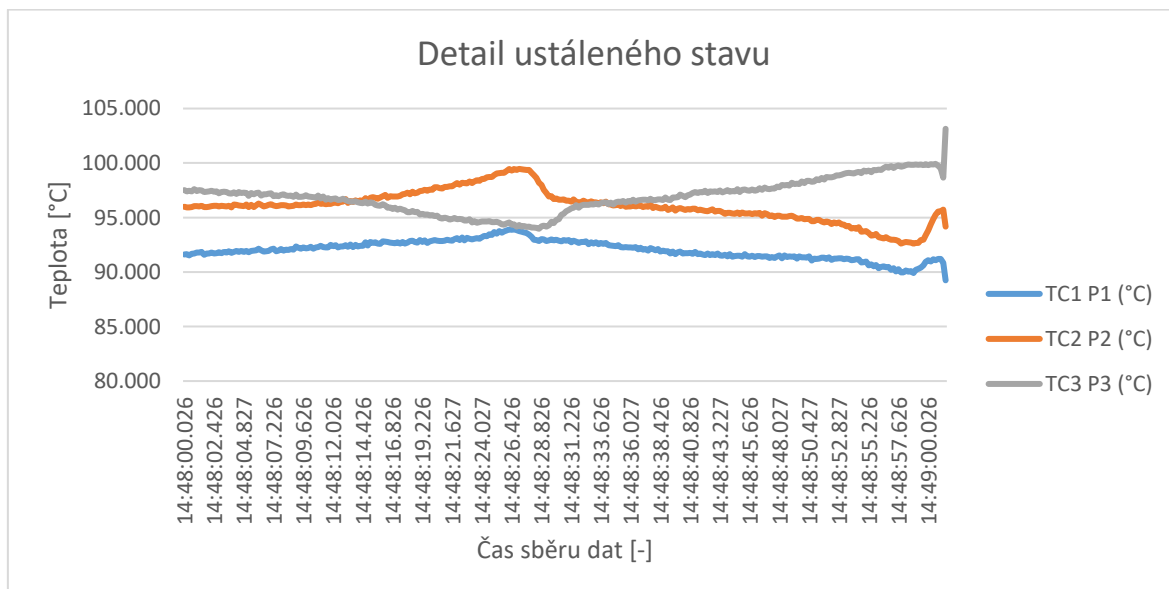
Jak je patrné z obr. (6.1) ustálená teplota všech tří vzorků se pohybovala na hranici 70 °C. Když se podíváme na detail ustáleného stavu na obr. (6.2), je patrné, že je mezi jednotlivými senzory zaznamenáván určitý teplotní rozdíl, který je při tomto měření ještě poměrně malý. Nejvyšší teplotu zaznamenává senzor TC 3, který je umístěn v ohybu mezi cívkovou stranou a čelem vinutí. Tento senzor má jako jednu z posledních zaznamenaných hodnot teploty 69,691 °C. Druhou nejvyšší teplotu ustáleného stavu zaznamenal senzor TC 2, který je také umístěn v záhybu, konkrétně v čele vinutí, a to teplotu 67,449 °C. Nejnižší teplotu ustáleného stavu zaznamenal senzor TC 1, který je jako jediný umístěn v rovné části měřeného vzorku, a to v cívkové straně. Tento senzor zaznamenal hodnotu teploty 65,515 °C. První měření zatím potvrdilo vyšší zahřátí ohybů, rozdíl ale není v tomto případě nijak markantní, neboť se jedná přibližně o 2 °C mezi jednotlivými senzory.

6.2 Druhé měření $I_s = 641,5$ A

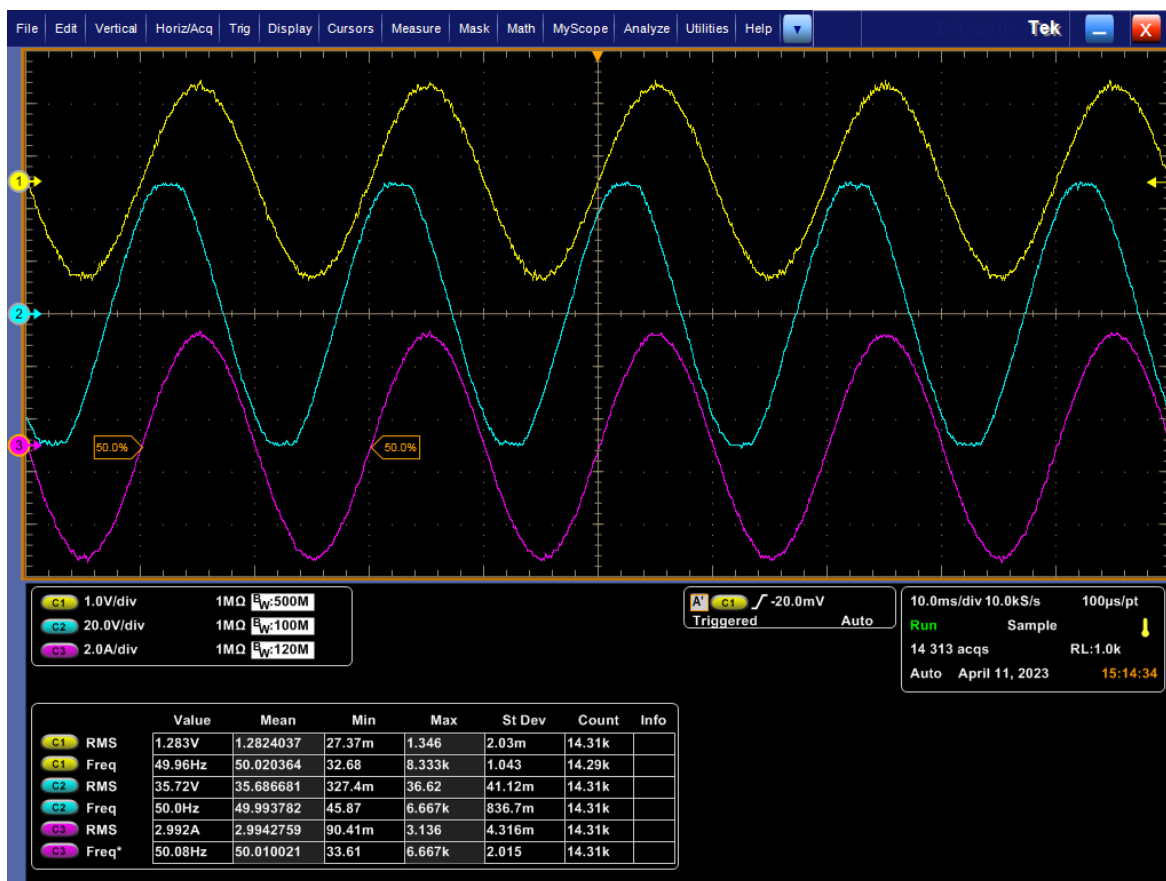
Druhé měření vyžadovalo nastavení primárního proudu na 3 A, skutečně nastavená hodnota je 2,992 A, což vede na napětí sekundární strany 1,283 V a proud sekundární stranou 641,5 A. Měření bylo zahájeno v 15:08 a ukončeno v 15:48 a zabralo tedy opět 40 minut.



Graf 6.3: Průběh měření teploty druhého vzorku



Graf 6.4: Detailní ukázka ustáleného stavu druhého vzorku

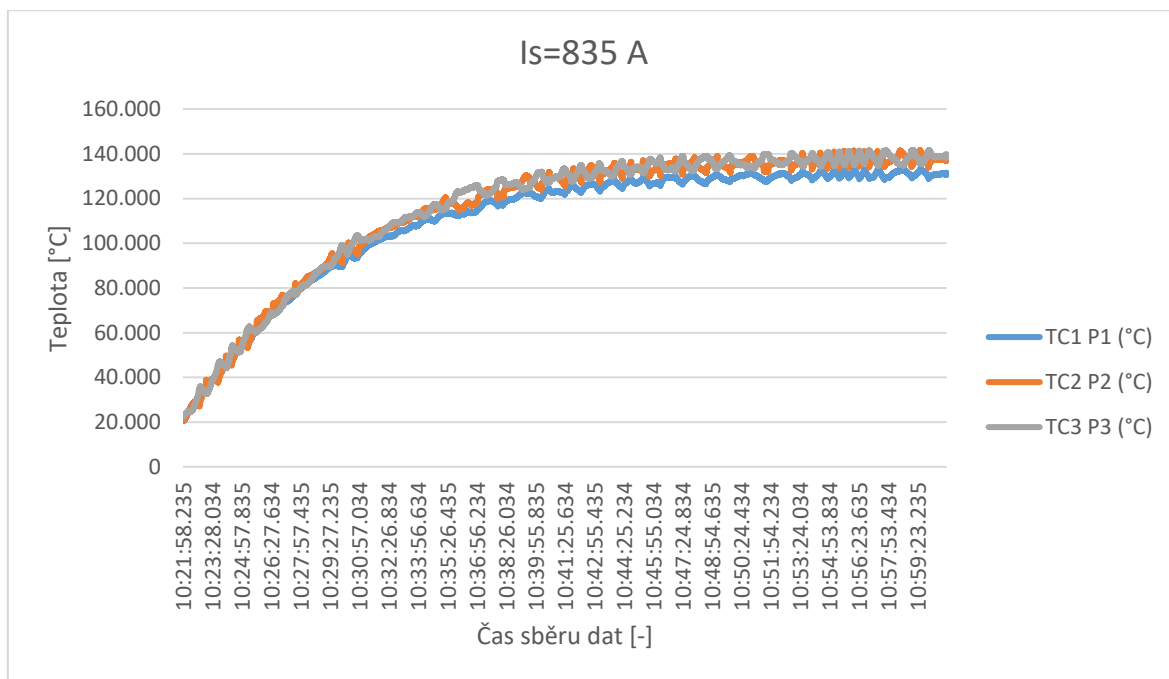


Obrázek 6.2: Záznam obrazovky osciloskopu pro druhé měření

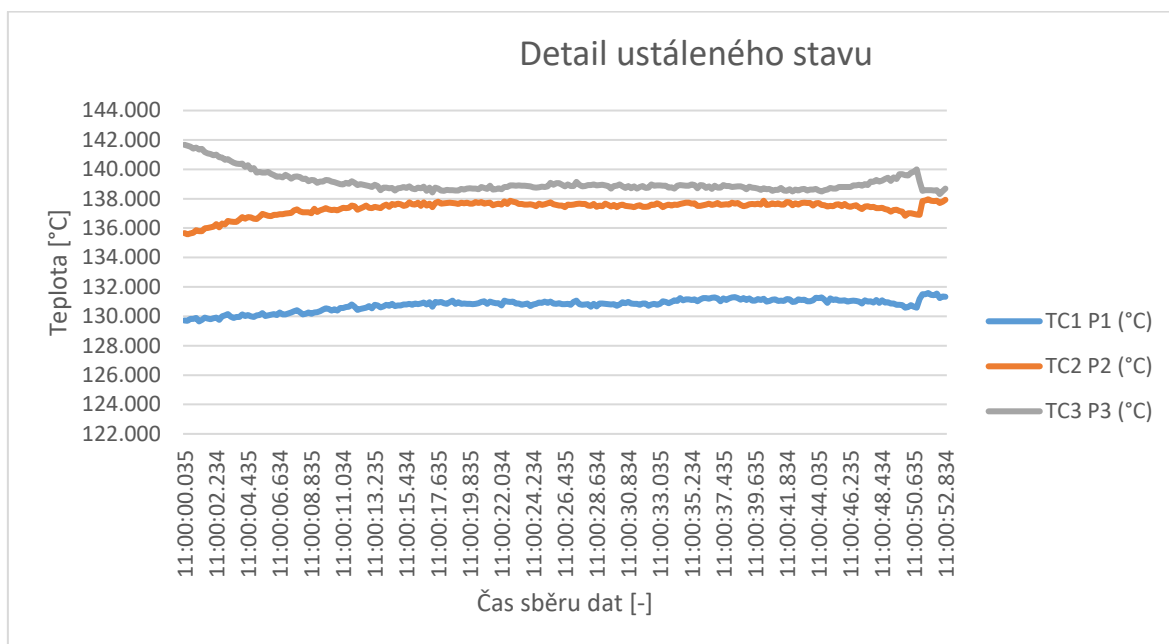
Obr. (6.4) nám naznačuje ustálení teploty vzorku okolo hranice 100 °C. Z detailu ustáleného stavu lze vyčíst, že měřené hodnoty senzorů jsou TC 1 = 90,839 °C, TC 2= 95,720 °C a TC 3= 103,141 °C. Opět dochází k tomu, že senzor, jež není umístěn v ohybu vykazuje nejmenší naměřenou teplotu. Nyní je ovšem rozdíl ještě patrnější než při prvním měření. Rozdíl mezi senzory TC 1 a TC 2 činí 4,881 °C a mezi senzory TC 1 a TC 3 se jedná o hodnotu 12,302 °C. Dá se tedy přepokládat, že se bude s vyšším sekundárním proudem tento rozdíl dále zvyšovat.

6.3 Třetí měření $I_s = 835$ A

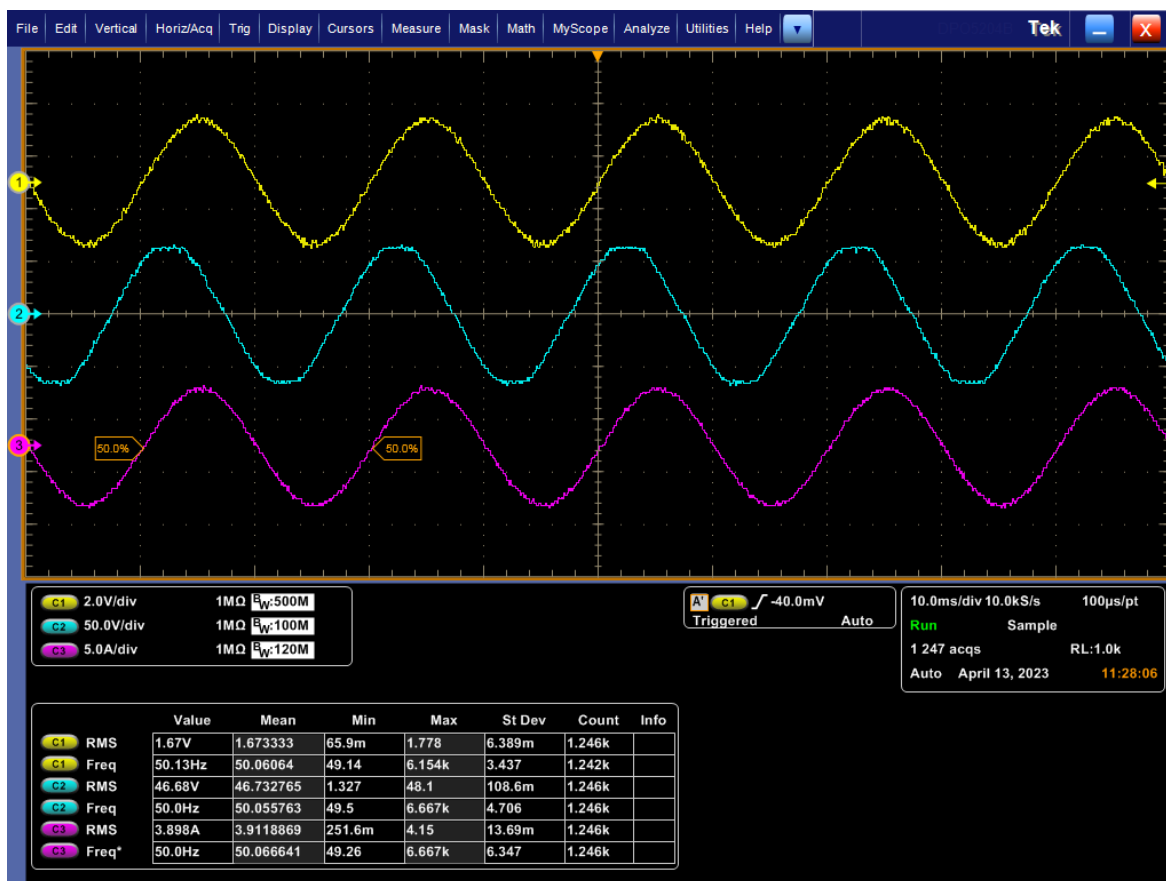
Požadovaná nastavená hodnota primárního proudu třetího měření byla 4 A a skutečně nastavená hodnota je 3,898 A. Osciloskop signalizuje hodnotu napětí na sekundární straně 1,67 V, což znamená, že sekundární stranou protéká proud o velikosti 835 A. Měření bylo zahájeno v 10:20 a ukončeno ve 11:00, což opět vede na dobu měření 40 minut.



Graf 6.5: Průběh měření teploty třetího vzorku



Graf 6.6: Detailní ukázka ustáleného stavu třetího vzorku

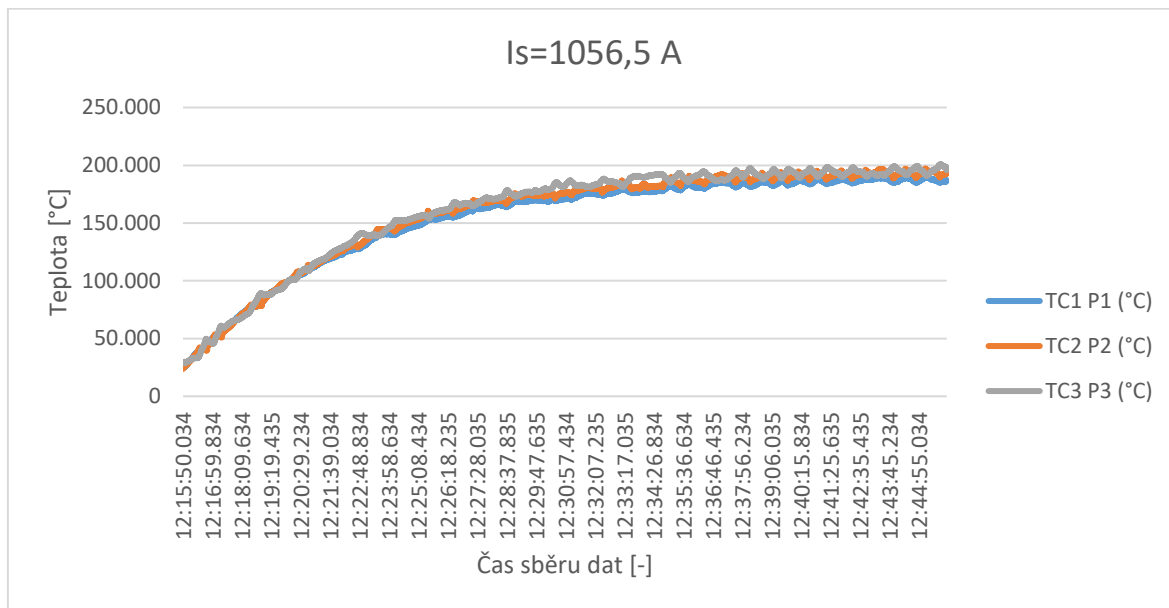


Obrázek 6.3: Záznam obrazovky osciloskopu pro třetí měření

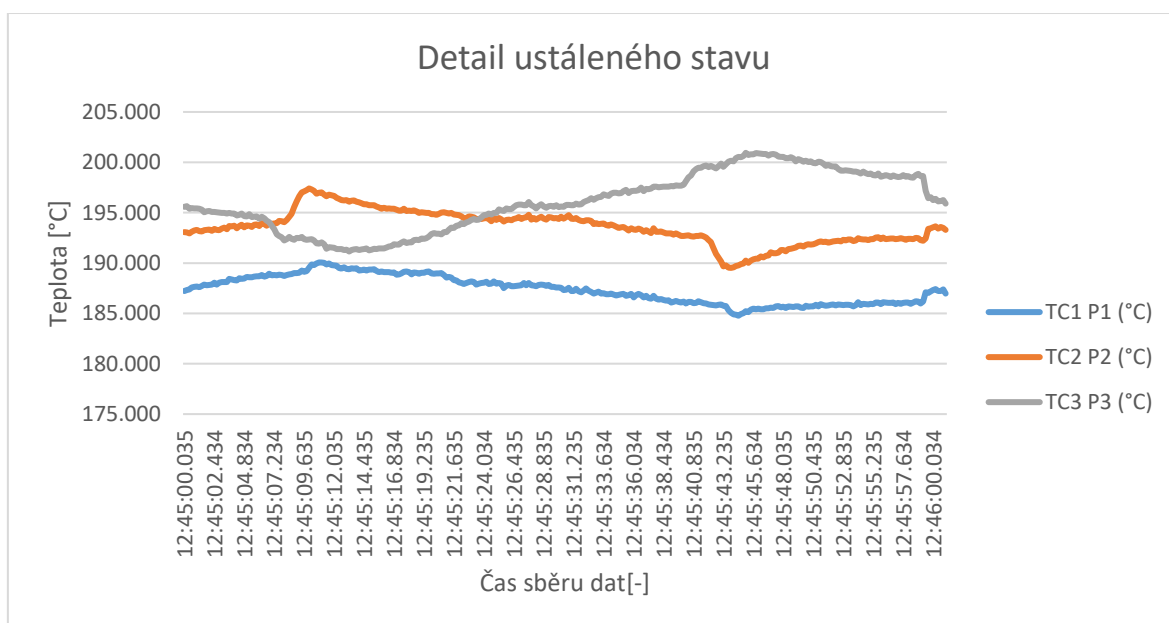
Při tomto měření je z průběhu teploty patrné, že k ustálení hodnot teploty dochází na pomezí 140 °C. Naměřené hodnoty jednotlivých senzorů jsou TC 1 = 131,5, TC 2 = 137,929 a TC 3 = 139,998. Vidíme, že rozdíl mezi teplotou rovné části a ohybů je nyní 6,429 °C mezi TC 1 a TC 2 a 8,498 °C mezi TC1 a TC3. Je patrné, že se rozdíl mezi prvním a druhým senzorem mírně zvětšil oproti druhému měření, ale rozdíl mezi prvním a třetím senzorem je naopak menší. Tato změna ale může být způsobena i vlivem okolí. Zároveň se při tomto měření více přiblížily teploty druhého a třetího senzoru, mezi nimiž je nyní rozdíl pouze 2 °C a v přechodím měření se jednalo o rozdíl téměř 8 °C.

6.4 Čtvrté měření $I_s = 1056,5$ A

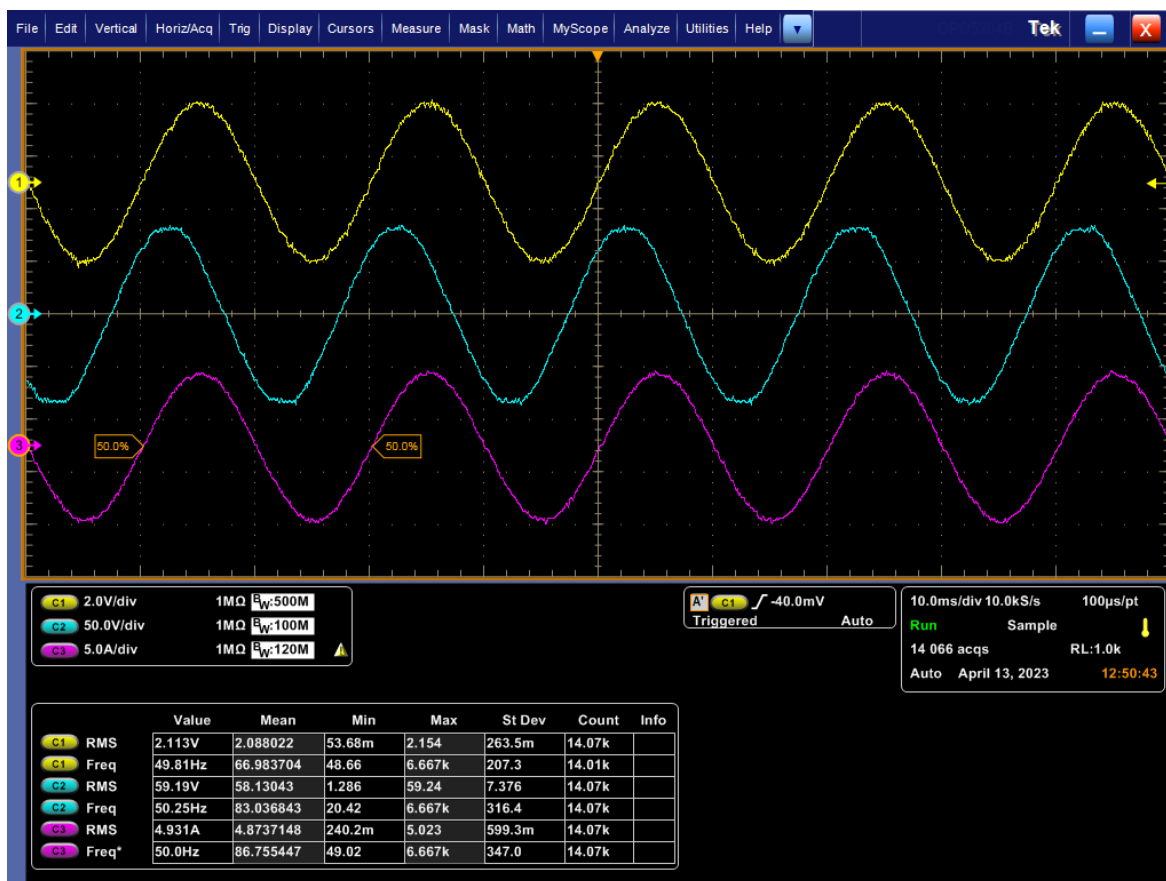
Na zdroji se nám podařilo nastavit hodnotu primárního proudu tohoto měření na hodnotu 4,931 A, osciloskop měří hodnotu sekundárního napětí 2,113 V. Proud protékající sekundární stranou sestavy je stanoven na 1056,5 A. Poprvé zde máme důkaz toho, že se zvyšující se hodnotou protékajícího proudu dochází k dřívějšímu zajištění ustáleného teplotního stavu. Toto měření totiž začalo ve 12:15 a skončilo ve 12:45, což vede na dobu měření 30 minut.



Graf 6.7: Průběh měření teploty čtvrtého vzorku



Graf 6.8: Detailní ukázka ustáleného stavu čtvrtého vzorku

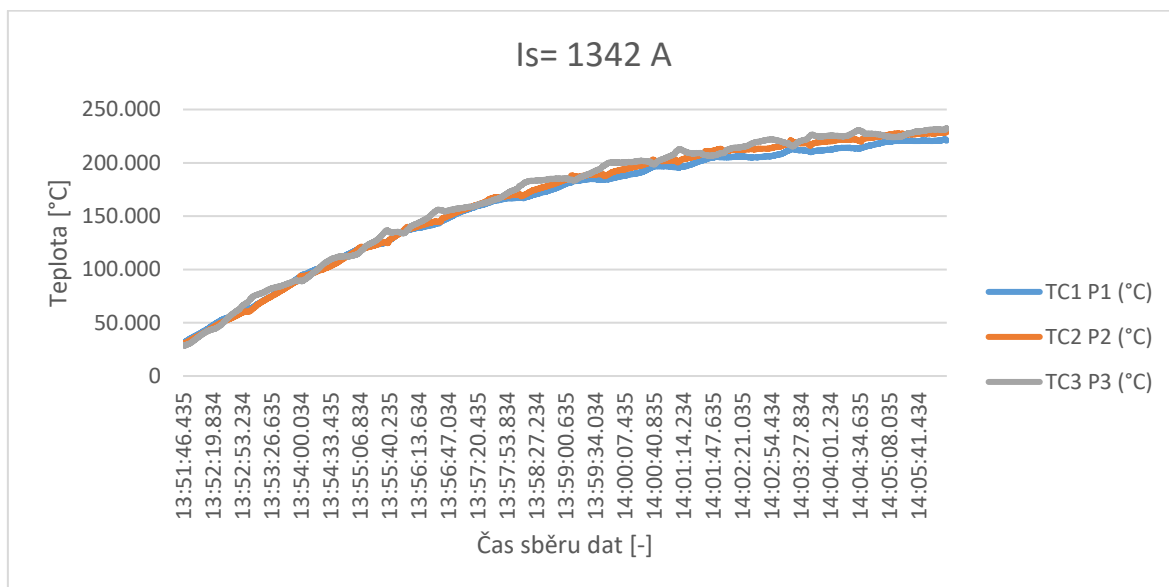


Obrázek 6.4: Záznam obrazovky osciloskopu pro čtvrté měření

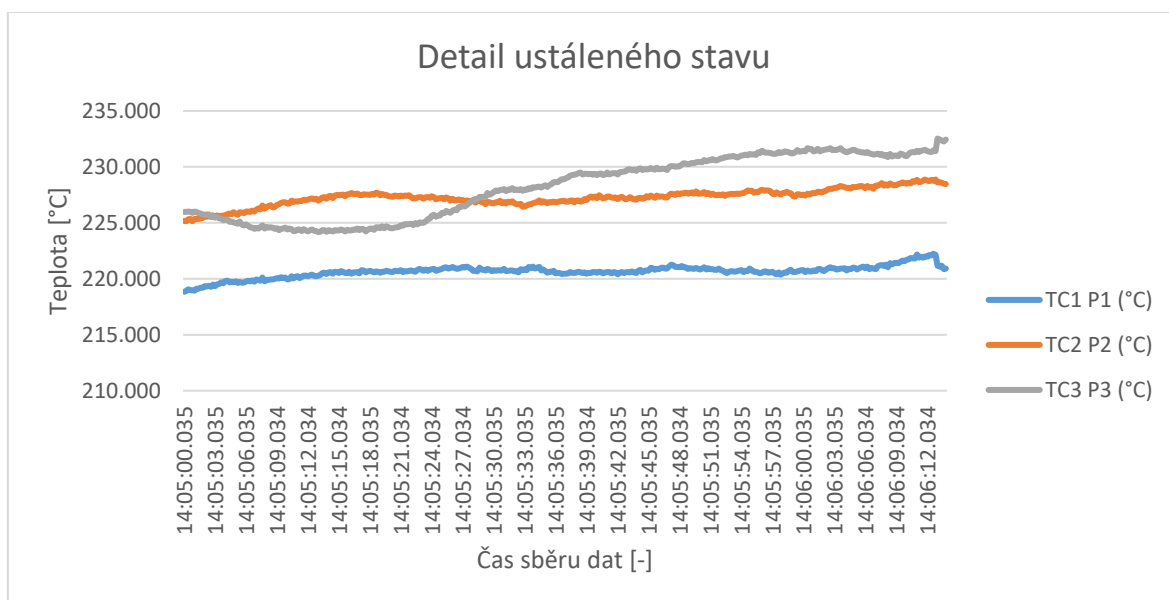
Jak již bylo zmíněno, cílem práce bylo dosáhnout teploty vzorku alespoň 200 °C a jak je z obr. (6.10) patrné, této hodnotě se již velmi blížíme. Dokonce jsme zde hodnoty 200 °C dosáhli, ale pouze jedním ze senzorů, a to senzorem TC 3. Senzor TC 3 konkrétně zaznamenal hodnotu 200,811 °C zatím co senzor TC 1 dosáhl teploty 187,369 °C a TC 2 teploty 193,429 °C. Zaznamenáváme zde zatím největší teplotní rozdíl, a to mezi senzory TC1 a TC3, který konkrétně činí 13,442 °C.

6.5 Paté měření $I_s = 1342$ A

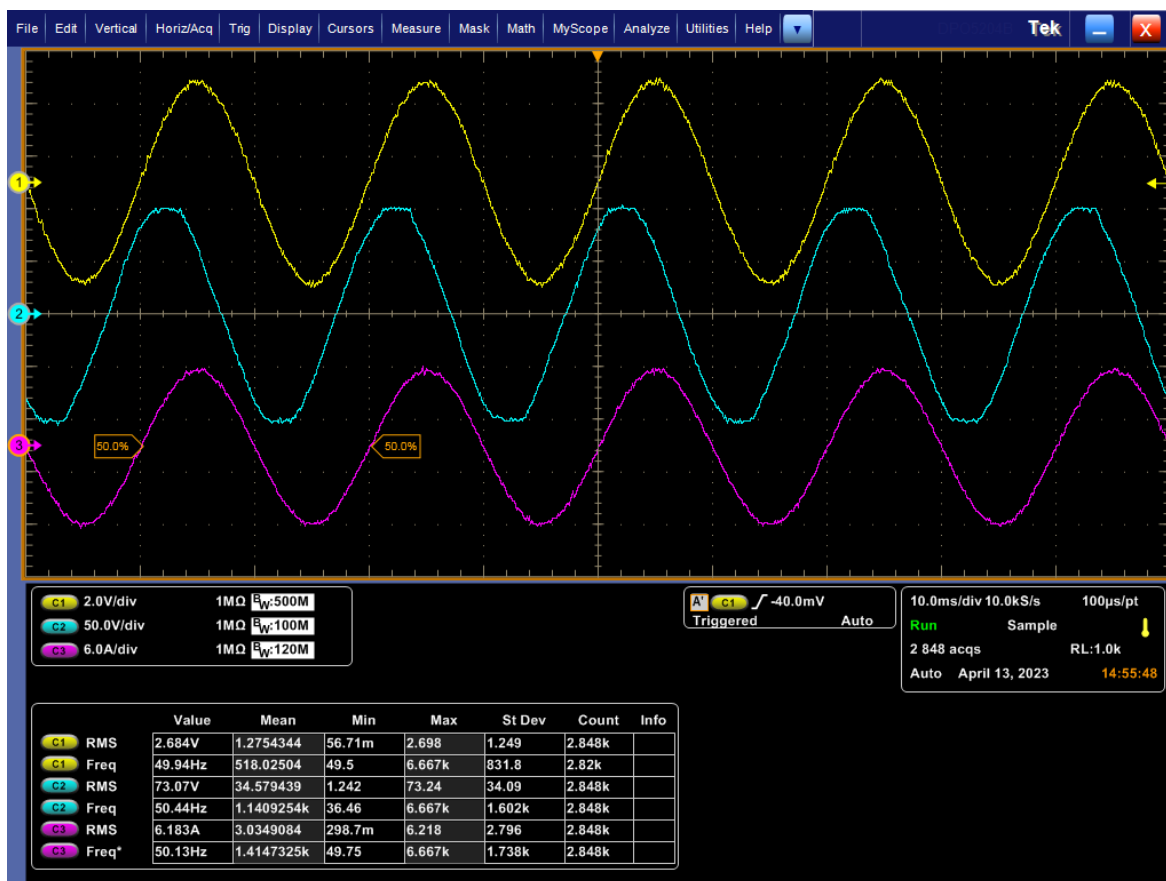
Vzhledem k tomu, že teploty 200 °C v předchozím měření nedosáhly všechny tři senzory, bylo rozhodnuto provést ještě jedno měření tak, aby k tomu došlo. Nyní jsme zdrojem nastavili hodnotu primárního proudu na 6,183 A a napětí sekundární strany jsme zaznamenali 2,6864 V. To vede na sekundární proud o velikosti 1342 A. Začátek měření proběhl ve 13:50 a jednalo se o nejkratší měření, jelikož konec měření byl v 14:05, měření tedy zabralo pouhých 15 minut.



Graf 6.9: Průběh měření teploty pátého vzorku



Graf 6.10: Detailní ukázka ustáleného stavu pátého vzorku



Obrázek 6.5: Záznam obrazovky osciloskopu pro páté měření

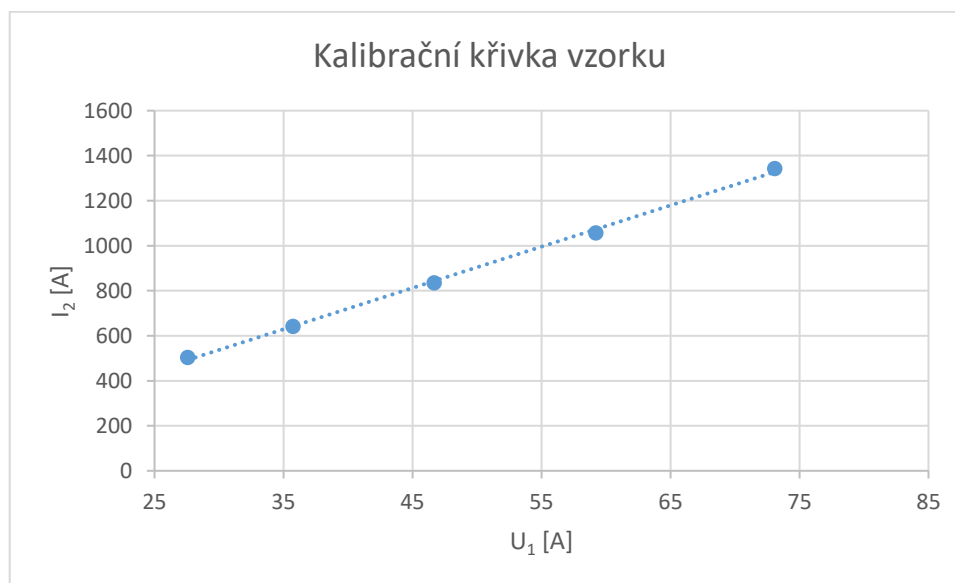
Při pátém měření se nám podařilo překročit hranici 200 °C pro všechny tři senzory teploty. Senzor TC 1 dosáhl hodnoty 222,140 °C, zatímco oba senzory umístěné v ohybech překročili hodnotu 225 °C. Konkrétně senzor TC 2 zaznamenal nejvyšší teplotu 229,469 °C a senzor TC 3 dosáhl dokonce hodnoty 233,147 °C. Rozdíl mezi prvním a třetím senzorem je v tomto případě 11,07 °C a mezi prvním a druhým senzorem 7,329 °C.

Diskuse výsledků měření teploty vzorku

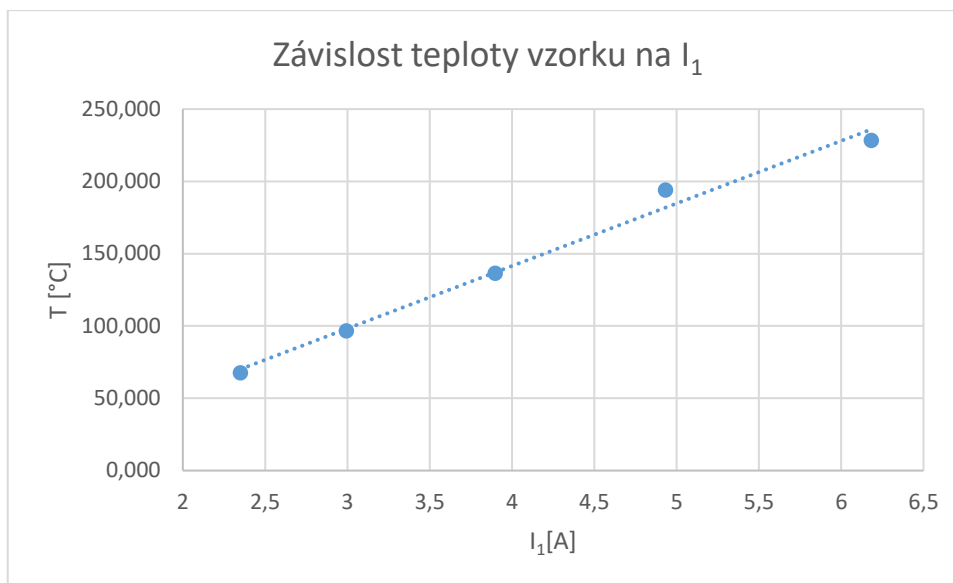
Jak již bylo v práci několikrát zmíněno, cílem bylo provést měření oteplení vzorku procházeného proudem a zjištění, zda dochází k většímu oteplení ohybů než rovných částí. Z předchozí kapitoly je patrné, že můžeme tento počáteční předpoklad považovat za pravdivý. Ve všech měřeních nám totiž vždy signalizoval nejnižší teplotu právě senzor TC 1, který je jako jediný umístěn v rovné části. Před začátkem měření nebylo jasné, zda bude rozdíl v teplotách dostatečně markantní, abychom mohli tento závěr vyvodit. Nyní ale vidíme, že například ve čtvrtém měření je rozdíl teplot mezi TC1 a TC3 13,442 °C, což je poměrně citelný rozdíl, zvláště pokud uvážíme, že jsou senzory umístěny pouze pár centimetrů od sebe a jsou připojeny do stejného kovového vzorku s dobrou tepelnou vodivostí. Pro přehlednost je v následující tabulce uveden výčet výsledků.

Tabulka 6.2:Přehled zaznamenaných výsledků

Měření	U_1	U_2	I_1	I_2	$\frac{TC\ 1 + TC\ 2 + TC\ 3}{3}$
1.	27,56	1,005	2,349	502,5	67,552
2.	35,72	1,283	2,992	641,5	96,567
3.	46,68	1,67	3,898	835	136,476
4.	59,19	2,113	4,931	1056,5	193,870
5.	73,07	2,6864	6,183	1342	228,252



Graf 6.11:Kalibrační křivka pro měřený závit



Graf 6.12: Závislost teploty na nastavovaném primárním proudu

Na grafu (7.1) můžeme vidět kalibrační křivku pro měřený vzorek (závit). Pokud porovnáme hodnoty kalibračních křivek z kap. (5.1.6), ve které jsme tvořili tyto křivky pro jiný (zkušební) vzorek, s kalibrační křivkou vzorku, na kterém bylo prováděno měření teploty, zjistíme, že mají velmi podobné výsledky. U třetího zkušební vzorku po nastavení napětí primární strany $U_1 = 26$ V jsme naměřili hodnotu sekundárního proudu $I_2 = 491$ A. Pokud se podíváme do tabulky (7.1) na první měření, vidíme, že nám pro hodnotu $U_1 = 27,56$ V vyšla hodnota sekundárního proudu $I_2 = 502,5$ A, což je velmi blízký výsledek.

V grafu (7.2) byla vytvořena závislost mezi primárním proudem I_1 a průměrnou teplotou vzorku tak, abychom při dalším měření mohli přímo přibližně odhadnout, jaký primární proud má být na zdroji nastaven pro dosažení konkrétní ustálené teploty.

Závěr

Úkolem předložené diplomové práce bylo vytvořit experimentální sestavu pro měření oteplení vzorku vinutí a namáhání izolace tohoto vinutí. Elektrické točivé stroje jsou v technice velmi používanou technologií, a proto je jakékoliv jejich studium velkým přínosem pro kvalitu strojů a pro bezpečnost práce. Jak je ze zadání patrné, pro správné pochopení této práce jsou nutné znalosti napříč několika obory z prostředí elektrotechniky. Proto jsou v prvních čtyřech kapitolách detailně popsány teoretické aspekty. První kapitola nám přibližuje vznik tepla při průchodu elektrického proudu obecně vodičem. V následujících dvou kapitolách jsou poté uvedeny nutné znalosti z oblasti elektrických strojů jak točivých, tak netočivých. Poslední teoretická kapitola zmiňuje podstatné z oboru měření teploty.

V následující části jsme se přesunuli k vytvoření této zkušební sestavy, kterou jsme nejprve využili na tvorbu kalibračních křivek zkušebních vzorků. Ty slouží jako představa toho, jaké velikosti napětí a proudů můžeme při měření očekávat.

Před samotným měřením oteplení bylo potřeba na měřeném vzorku provést hned několik úprav, které byly nutné pro správnou funkčnost. Nejprve bylo nutné vodivě spojit konce závitů dohromady, které byly původně rozpojeny. Dále byl na vzorek umístěn rozebíratelný spoj pro správné uchycení vzorku na izolátor tak, aby bylo měření bezpečné. Poslední nutnou opravou bylo umístění měřicích senzorů do jádra vzorku. Nejprve jsme tedy do vzorku vyvrtali díry a do nich umístili měřicí senzory.

Když vzorek prošel potřebnými úpravami, bylo možné začít se samotným měřením teploty. Cílem měření bylo zjistit, zda se záhyby měřeného vzorku ohřívají více než části rovné. Dalším požadavkem bylo překročit hranici měření 200 °C, neboť právě tato hodnota teploty byla výrobcem udávána jako teplota, kterou by měla izolace dlouhodobě vydržet bez urychlení její degradace.

Následně bylo provedeno pět testovacích měření oteplení vzorku pro $I_1 = 2-6$ A s krokem 1 A. Dle předpokladu docházelo se zvyšováním sekundárního proudu i ke zvyšování teploty vzorku a zároveň k rychlejšímu dosáhnutí teplotně ustáleného stavu. Zároveň došlo i k potvrzení předpokladu většího oteplení ohybů, než rovných částí. Ve všech měřeních vykazoval vždy nejnižší teploty senzor TC 1, který byl jako jediný umístěn v cívkové straně, a tedy v rovné části. Největší teplotní rozdíl mezi ohybem a rovnou částí byl zaznamenán ve čtvrtém měření a činil rozdíl o bezmála 14°C.

Vzhledem k tomu, že jsme mezní hodnotu izolace překročili pouze krátkodobě (na několik minut) a ne příliš výrazně (přibližně o 30 °C), nebyly po ukončení měření na izolaci vzorku patrné jakékoliv větší známky degradace. Stejně tak jsme nezaznamenali nijak výrazné rozdíly v opotřebení izolace mezi ohyby a rovnými částmi. Tyto závěry by mohli vést k myšlence, že není třeba zesilovat izolaci ohybů, ovšem toto tvrzení by vyžadovalo další měření a přímé testování izolace, na níž bylo měření oteplení prováděno. Tyto závěry jsou ale nad rámec této diplomové práce a mohli by být vhodným vzorem pro práci další.

Další testování a měření stavu izolace není jediným směrem, kam by se mohly závěry této práce rozšiřovat. Během měření jsme přišli i na další možná vylepšení pro následující výzkum oteplení vinutí elektrických strojů. Jak je patrné z průběhů teplot v kapitole 6, při ohřevu dochází k teplotním výkyvům a průběh není příliš hladký. Tato skutečnost může být způsobena okolními vlivy, jako je například cirkulace vzduchu v místnosti, kde měření probíhalo. Proto by bylo pro další výzkum této problematiky vhodné měřený vzorek umístit například do hermeticky uzavíratelné komory nebo přímo do komory vakuové. Dalším aspektem ovlivňující výsledky je fakt, že při měření byly senzory zavedeny přímo do měřicího vzorku, do kterého byl vytvořen vrt procházející taktéž izolací. Tím samozřejmě došlo k jejímu porušení v místě měření což by výrazně ovlivnilo i její následné testování. Pro další výzkum tohoto typu by stálo za zvážení použití jiné metody měření teploty, jako například užití termovize. Při použití termovize by nebylo nutné nijak zasahovat do izolace, což je velmi žádoucí. Další výhodou by bylo, že by termokamera přesně zaznamenala teploty jednotlivých částí měřeného vzorku a bylo by tak na první pohled patrné, že se ohyby ohřívají na vyšší teploty než rovné části.

Práce přináší nové poznatky o chování teploty v různých částech vinutí, zejména s ohledem na ohyby a rovné části vinutí. Výsledky ukazují, že ohyby vinutí se zahřívají více než rovné části, což je klíčová informace pro návrh a výrobu vinutí motorů, aby byla zajištěna jejich dlouhá životnost a spolehlivost. Dalším přínosem je, že bylo na fakultě elektrotechnické vyvinuto speciální měřicí zařízení, s použitím moderních nástrojů, jako je analýza dat pomocí softwaru LabVIEW, ke kterému jsou v práci dostupné i kalibrační křivky, takže může být zařízení snadno použitelné i pro další výzkum. Zjištěné výsledky mohou být aplikovány v průmyslové praxi, což podtrhuje význam tohoto výzkumu pro technickou praxi a vývoj nových technologií v oblasti elektrických strojů. Praktická doporučení, která z této práce vyplývají mohou vést k optimalizaci provozu a údržby asynchronních motorů

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1.1: Vliv skin efektu na rozložení proudové hustoty. (2)	- 3 -
Obrázek 1.2: Hloubka vniku pro jednotlivé frekvence. (2)	- 4 -
Obrázek 1.3: Oteplovací charakteristika. (4)	- 7 -
Obrázek 1.4: Závislost Q na r^2 . (8)	- 10 -
Obrázek 2.1: Jednofázové vinutí statoru. (10)	- 12 -
Obrázek 2.2: Třífázové vinutí statoru. (10)	- 12 -
Obrázek 2.3: Příklad hysterezní křivky.	- 15 -
Obrázek 2.4: Ztráty vířivými proudy.	- 15 -
Obrázek 2.5: Fázorový diagram reálného dielektrika	- 18 -
Obrázek 2.6: a) Paralelní spojení R_c b) Sériové spojení R_s	- 18 -
Obrázek 2.7: Jednotlivé části závitu vinutí.	- 20 -
Obrázek 2.8: a) Cívkové vinutí b) Tyčové vinutí	- 21 -
Obrázek 2.9: a) Jednovrstvé vinutí b) Dvouvrstvé vinutí	- 22 -
Obrázek 2.10: Drážky elektrického stroje a) otevřené b) c) polouzavřené d) uzavřené.	- 23 -
Obrázek 3.1: Základní schéma proudového transformátoru.	- 25 -
Obrázek 3.2: Konstrukce obdélníkového jádra a toroidního jádra.	- 26 -
Obrázek 3.3: Transformátor tyčového typu.	- 27 -
Obrázek 4.1: Princip bimetalového pásku.	- 30 -
Obrázek 4.2: Schematické znázornění termočlánku.	- 31 -
Obrázek 4.3: Závislost odporu na teplotě pro různé senzory teploty.	- 33 -
Obrázek 5.1: Schéma zapojení pro měření kalibračních křivek	- 35 -
Obrázek 5.2: Část sestavy pro měření kalibračních křivek - zdroj, osciloskop.	- 38 -
Obrázek 5.3: Část sestavy pro tvorbu kalibračních křivek – proudové měřicí kleště.	- 38 -
Obrázek 5.4: Část sestavy pro měření kalibračních křivek – umístění vzorku na izolátoru.	- 39 -
Obrázek 5.5: Schéma měřicí sestavy pro měření oteplení vzorku vinutí.	- 42 -
Obrázek 5.6: Kontrolér značky National instruments.	- 44 -
Obrázek 5.7: Vnitřní dispozice I/O modulu.	- 44 -
Obrázek 5.8: Připojení senzoru k I/O modulu.	- 44 -
Obrázek 5.9: Náčrt měřeného vzorku před úpravami.	- 45 -
Obrázek 5.10: Výkres úpravy vzorku.	- 46 -
Obrázek 5.11: Detail vodivého spojení.	- 46 -
Obrázek 5.12: Umístění senzorů teploty ve vzorku.	- 47 -
Obrázek 5.13: Ukázka vzorku po provedení úprav.	- 48 -
Obrázek 5.14: Ukázka teplotního měřicího systému.	- 49 -
Obrázek 5.15: Ukázka umístění vzorku v transformátoru a umístění teplotních senzorů.	- 49 -

Obrázek 5.16: Ukázka celé měřicí sestavy. _____	- 49 -
Obrázek 6.1: Záznam obrazovky osciloskopu pro první měření. _____	- 52 -
Obrázek 6.2: Záznam obrazovky osciloskopu pro druhé měření. _____	- 54 -
Obrázek 6.3: Záznam obrazovky osciloskopu pro třetí měření. _____	- 56 -
Obrázek 6.4: Záznam obrazovky osciloskopu pro čtvrté měření. _____	- 58 -
Obrázek 6.5: Záznam obrazovky osciloskopu pro páté měření. _____	- 60 -

Seznam použitých grafů

Graf 5.1: Kalibrační křivka pro první vzorek. _____	- 41 -
Graf 5.2: Kalibrační křivka pro druhý vzorek. _____	- 41 -
Graf 5.3: Kalibrační křivka pro třetí vzorek. _____	- 41 -
Graf 6.1: Průběh měření teploty prvního vzorku. _____	- 51 -
Graf 6.2: Detailní ukázka ustáleného stavu prvního vzorku. _____	- 51 -
Graf 6.3: Průběh měření teploty druhého vzorku. _____	- 53 -
Graf 6.4: Detailní ukázka ustáleného stavu druhého vzorku. _____	- 53 -
Graf 6.5: Průběh měření teploty třetího vzorku. _____	- 55 -
Graf 6.6: Detailní ukázka ustáleného stavu třetího vzorku. _____	- 55 -
Graf 6.7: Průběh měření teploty čtvrtého vzorku. _____	- 57 -
Graf 6.8: Detailní ukázka ustáleného stavu čtvrtého vzorku. _____	- 57 -
Graf 6.9: Průběh měření teploty pátého vzorku. _____	- 59 -
Graf 6.10: Detailní ukázka ustáleného stavu pátého vzorku. _____	- 59 -
Graf 7.1: Kalibrační křivka pro měřený závit. _____	- 61 -
Graf 7.2: Závislost teploty na nastavovaném primárním proudu. _____	- 62 -

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1.1: Hloubka vniku pro různé materiály při různé frekvenci. _____	- 4 -
Tabulka 4.1: Přehled měřících metod teploty _____	- 28 -
Tabulka 4.2: Přehled termoelektrických článků. _____	- 31 -
Tabulka 4.3: Přehled materiálů pro kovové odporové teploměry. _____	- 32 -
Tabulka 5.1: Tabulka použitých přístrojů. _____	- 36 -
Tabulka 5.2: Naměřené hodnoty kalibrační křivky pro první vzorek. _____	- 40 -
Tabulka 5.3: Naměřené hodnoty kalibrační křivky pro druhý vzorek. _____	- 40 -
Tabulka 5.4: Naměřené hodnoty kalibrační křivky pro třetí vzorek. _____	- 40 -
Tabulka 5.8: Použité přístroje v sestavě pro měření teploty vzorku. _____	- 43 -
Tabulka 6.1: Ukázka zaznamenaných hodnot z měření. _____	- 50 -
Tabulka 7.1: Přehled zaznamenaných výsledků. _____	- 61 -

Bibliografie

1. **HOFMANN, J. URBANOVÁ M.** *Fyzika I.* 1.0. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005.
2. **MAYER, Daniel.** *Teorie elektromagnetického pole.* 3.vydání. Plzeň : Západočeská univerzita, 2004. Sv. 2. 80-7082-826-9.
3. **RUSŇÁK, Štěpán ŘEZÁČEK, Petr.** *Elektrické přístroje 1.* 2. přepracované vydání. Plzeň : Západočeská univerzita, 2001. str. 155. 80-7082-825-0.
4. **Drexler, Ing. Jaroslav.** *Měření oteplovací charakteristiky část 3-3-1 Teoretický rozbor.* Šumperk : autor neznámý.
5. **Martin, KUPILÍK.** *Dynamický ohřev kabelových vodičů.* [Bakalářská práce] Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2013.
6. **HAVELKA, Otto.** *Elektrické přístroje.* 1. Vydání. Praha : SNTL, 1985. str. 436.
7. **KOTLAN, Jiří.** *Úvod do elektrotechniky.* Plzeň : Západočeská univerzita, 2007.
8. **ÇENGEL, Yunus A GHAJAR, Afshin J.** *Heat and mass transfer: fundamentals & applications.* 4th ed. New York : McGraw-Hill, 2011. str. 924. 978-0-07-339812-9.
9. **BARTOŠ, Václav. et. al.** *Elektrické stroje. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2011, 140 s. ISBN 978-80-7043-444-4.*
10. **Turek, Miroslav.** *Točivé stroje a jejich izolační systémy.* [Bakalářská práce] Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2013.
11. **PETROV, G.** *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje. 1. vyd. Praha: Academia, 1982, 728 s.*
12. **VLADAŘ, Jaroslav a Jiří ZELENKA.** *Elektrotechnika a silnoproudá elektronika. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1986.*
13. **Karel, Chmelík.** *ELEKTRICKÉ STROJE V ENERGETICE .* Ostrava : Technická univerzita Ostrava.
14. **Informační portál energetické gramotnosti.** [Online] Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2018. <https://www.informacni-portal.cz/clanek/ztraty-v-transformatoru>.
15. **Vachuda, Viktor.** *Detekce povrchových vad s využitím vířivých proudů.* [Bakalářská práce] Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2017 .
16. **KONEČNÁ, Eva a Aleš RICHTER.** *ELEKTRICKÉ STROJE: Učební texty. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. [online]. Upravené vydání. Liberec, 2000*

[cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <https://www.fm.tul.cz/ustavy/ustav-mechatroniky-a-technicke-informatiky/o-ustavu>.

17. MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN -technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.*

18. Laboratorní cvičení z techniky vysokého napětí: Úloha č. 16: Ztráty v dielektriku – Scheringův můstek. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: home.pilsfree.net/pierre/K20tisku/tvnnav/Nav16.doc.

19. KOPYLOV, I. P., *Stavba elektrických strojů. Praha, SNTL, 1988.*

20. WIEDEMANN, E., KELLENBERGER, W., *Konstrukce elektrických strojů, Praha, SNTL, 1973.*

21. ElektroPrůmysl.cz. *Transformátor proudu - konstrukce, princip činnosti a typy.* [Online] 28. 6 22. <https://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/transformator-proudu-konstrukce-princip-cinnosti-a-typy>.

22. Dokument z webu dostupné z: <https://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.

23. E-manuel. *Elektronická učebnice fyziky pro gymnázia- Tepelné jevy.* [Online] <https://e-manuel.cz/kapitoly/tepelne-jevy/vyklad/teplota/>.

24. Wikipedia.com. [Online] https://cs.wikipedia.org/wiki/Termoelektrick%C3%BD_jev.

25. Energetický ústav- Fakulta strojního inženýrství. Brno : Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z : <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0700.htm>

26. Instruments, National. National Instruments NI 9214 Manual | ArtisanTG. artisanTG.com. [Online] https://www.artisanTG.com/info/National_Instruments_NI_9214_Manual_20187209369.pdf f.

30. PETROV. Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2. Praha: Academia, 1982. 1. Vydání. str. 728.*