

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Srovnání experimentálních metod zjišťování oteplení v
elektrotechnice

Comparison of Experimental Methods Used for Finding
of Temperature Rise in Electrotechnics

2017

David Beneš

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **David Beneš**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika

Téma: Srovnání experimentálních metod zjišťování oteplení v elektrotechnice.
Comparison of Experimental Methods Used for Finding of Temperature Rise in Electrotechnics

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor tepelných ztrát vznikajících v elektrických strojích a přístrojích.
2. Metody experimentálního sledování oteplení elektrotechnických zařízení.
3. Praktické ověření vybraných metod na jističi nn.
4. Srovnání dosažených výsledků a vyvození výhod a nevýhod jednotlivých metod.

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Havelka, O.: Elektrické přístroje, SNTL 1985
2. Artbauer, O.: Tepelný výpočet elektrických přístrojov, SVŠT Bratislava 1963

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 24.4.2014

David Bezd
.....
Jméno a příjmení

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Zdenku Hytkovi, CSc. za odborný dohled, znalosti z praxe a vedení.

Abstrakt

Má bakalářská práce je zaměřená na různé metody měření oteplení na elektrických strojích a přístrojích. Toto oteplení vzniká vlivem působení ztrát. Tyto ztráty jsou v první kapitole teoreticky rozebrány. Ve druhé kapitole jsou vysvětlené různé metody bezkontaktního a kontaktního měření teploty a uvedené výhody a nevýhody těchto metod. V praktické části je provedeno měření teploty na jističi nízkého napětí pomocí termokamery a termočlánku. Dosažené výsledky jsou zpracovány do grafů a následně graficky porovnány. V závěru mé bakalářské práce jsou tyto výsledky rozebrány a uvedeny výhody a nevýhody těchto metod měření teploty.

Klíčová slova

Ztráty, oteplování, metody měření teploty, termokamera, termočlánek.

Abstract

My bachelor thesis is focused on different kinds of methods how to measure a heating of electrical machines and devices. The heating is created by an influence of losses. The losses are theoretically described in the first chapter. Description of different kinds of methods of contact and contactless thermal measuring is located in the second chapter, where are also mentioned advantages and disadvantages of these methods. The practical part consists of the measuring of a temperature on a circuit breaker by thermocamera and thermocouple. These measured values are shown in graphs and are graphically compared. The results, the advantages and the disadvantages of these kinds of methods are discussed in the conclusion of the bachelor thesis.

Key words

Losses, heating, methods of measuring the temperature, thermocamera, thermocouple.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	7
Seznam ilustrací a tabulek.....	9
Úvod.....	10
1 Teoretický rozbor ztrát v elektrických zařízeních:.....	11
1.1 Druhy ztrát	11
1.1.1 Výkonové ztráty ΔP	11
1.1.1.1 Odpor vodiče	11
1.1.1.2 Odpor vodiče při střídavém proudu.....	11
1.1.2 Ztráty v železe ΔP_{Fe}	13
1.1.2.1 Ztráty vířivými proudy ΔP_{FeV}	13
1.1.2.2 Ztráty hysterezní ΔP_{FeH}	14
1.1.3 Dielektrické ztráty	15
1.2 Oteplování proudovodiče	15
1.3 Oteplování při přerušovaném chodu	18
1.4 Krátkodobé oteplení	19
2 Metody měření teploty na elektrotechnických zařízeních.....	20
2.1 Bezkontaktní měření	20
2.1.1 Pyrometry	21
2.1.2 Termokamery	22
2.2 Kontaktní měření.....	23
2.2.1 Odporové senzory	23
2.2.2 Termoelektrické senzory	24
2.2.3 Indikátory teploty	26
3 Praktické ověření vybraných metod na jističi nízkého napětí	27
3.1 Návrh pracoviště	27
3.2 Schéma zapojení.....	27
3.3 Měření oteplení pomocí termokamery	28
3.3.1 Flir T420.....	28
3.3.2 Měření oteplovacích křivek.....	29
3.4 Měření oteplení pomocí termočláčku.....	32
3.4.1 Multimetr Voltcraft VC-155	32

3.4.2	Měření oteplovacích křivek.....	33
3.5	Srovnání dosažených výsledků	36
	Závěr	38
	Použitá literatura	39

Seznam použitých symbolů a zkratek

ΔP	Výkonové ztráty	(W)
R	Odpor	(Ω)
I	Elektrický proud	(A)
ρ	Rezistivita	($\Omega \cdot m$)
l	Délka	(m)
S	Plocha	(mm ² ;m ²)
ρ_{rf}	Rezistivita při referenční teplotě ϑ_{rf}	($\Omega \cdot m$)
ϑ_{rf}	Referenční teplota	(°C,K)
α	Teplota	(K ⁻¹)
ϑ	Teplota	(°C,K)
J	Proudová hustota	(A/mm ²)
a	Efektivní hloubka vniku	(mm)
ω	Úhlová rychlost	(rad/s)
μ	Permeabilita prostředí	(H·m ⁻¹)
γ	Měrná elektrická vodivost	(S·m ⁻¹)
k_{zh}	Činitel povrchového zhuštění proudu	(-)
k_{bl}	Činitel blízkosti	(-)
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe	(W)
ΔP_{FeV}	Ztráty vířivými proudy	(W)
ΔP_{FeH}	Ztráty hysterezní	(W)
B	Magnetická indukce	(T)
f	Frekvence	(Hz)
Q	Tepelné ztráty	(J)
A	Ochlazovací povrch tělesa	(m ²)
c	Objemová tepelná kapacita	(J/m ³ ·K)

V	Objem	(m^3)
α_0	Součinitel přestupu tepla	$(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$
t	Čas	(s)
$\Delta\vartheta_\infty$	Ustálená teplota	$(^\circ\text{C}, \text{K})$
$\Delta\vartheta_0$	Počáteční teplota	$(^\circ\text{C}, \text{K})$
τ	Časová konstanta	(s)
B	Integrační konstanta	$(-)$
K	Integrační konstanta	$(-)$
$\Delta\vartheta_{\text{kd}}$	Krátkodobé oteplení	$(^\circ\text{C}, \text{K})$
ϑ_0	Teplota okolí	$(^\circ\text{C}, \text{K})$
σ	Proudová hustota	(A/m^2)
S_{AB}	Seebeckův koeficient	$(-)$
σ_{A}	Thomsonův koeficient	$(-)$
σ_{B}	Thomsonův koeficient	$(-)$
Al	Hliník	
Cu	Měď	
Si	Křemík	
SiC	Karbid křemíku	
VŠB	Vysoká škola báňská	

Seznam ilustrací a tabulek

Obr. 1 Rozložení hustoty proudu ve válcovém vodiči plného průřezu	12
Obr. 2 Jev blízkosti	13
Obr. 3 Znázornění vířivých proudů.....	14
Obr. 4 Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu	15
Obr. 5 Oteplovací a ochlazovací charakteristika.....	17
Obr. 6 Oteplování při přerušovaném provozu.....	19
Obr. 7 Odraz tepla lidské ruky na lesklém povrchu stroje	21
Obr. 8 Pyrometr.....	22
Obr. 9 Termokamera	22
Obr. 10 Graf závislosti teploty na odporu pro termistory KT100 a KT11	24
Obr. 11 Různé typy termočlánku	25
Obr. 12 Indikátor teploty	26
Obr. 13 Zapojení pracoviště	27
Obr. 14 Schéma zapojení	28
Obr. 15 Termokamera Flir T420	28
Obr. 16 Snímek z termokamery (t = 0s).....	29
Obr. 17 Snímek z termokamery (t = 134s).....	30
Obr. 18 Snímek z termokamery (t = 866s).....	30
Obr. 19 Snímek z termokamery (t = 1200s).....	31
Obr. 20 Oteplovací křivka nejteplejšího místa jističe	31
Obr. 21 Oteplovací křivka svorky jističe	32
Obr. 22 Oteplovací křivka kabelu	32
Obr. 23 Digitální multimetr Voltcraft VC-155	33
Obr. 24 Měření termočlánkem	34
Obr. 25 Oteplovací křivka jističe	35
Obr. 26 Oteplovací křivka svorky jističe	35
Obr. 27 Oteplovací křivka kabelu	36
Obr. 28 Vzájemné porovnání oteplovacích křivek jističe	36
Obr. 29 Vzájemné porovnání oteplovacích křivek svorky	37
Obr. 30 Vzájemné porovnání oteplovacích křivek kabelu	37
Tab. 1 Teplotní klasifikace izolantů	18
Tab. 2 Naměřené hodnoty pomoci multimetru Voltcraft VC-155	34

Úvod

Každý reálný vodič představuje pro elektrický proud jistý odpor. Tento odpor je dán délkou, průřezem a materiálem vodiče. S rostoucím elektrickým odporem rostou ve vodiči také tepelné ztráty. Proto musíme používat materiály s co nejmenším měrným odporem, vhodnou délkou a průřezem s ohledem na funkční a ekonomická hlediska.

Teplotní měření jsou velice důležitou částí diagnostiky elektrických strojů a zařízení. Jsou velmi důležitá pro jejich dlouhou životnost. Kvůli ztrátám může dojít k nadměrnému oteplení stroje nebo přístroje, a tím se zvyšuje šance, že dojde k poškození izolace, jejímu rychlejšímu stárnutí nebo okamžitá degradace, což většinou vede k elektrickému průrazu izolace, zážehu obloukového výboje a tím k zničení stroje. Jelikož se výrobci snaží stále snižovat výrobní náklady, důležitost diagnostiky se ještě zvyšuje.

Cílem mé bakalářské práce je seznámit se s teoretickým rozbohem ztrát vznikajících v elektrických strojích a přístrojích a rozbohem vzniku tepla vlivem těchto ztrát. Vysvětlit různé metody měření oteplení v elektrotechnice. V praktické části ověřím vybrané metody měření teploty na jističi nízkého napětí. Porovnáám dosažené výsledky těchto měření a určím výhody a nevýhody jednotlivých metod.

1 Teoretický rozbor ztrát v elektrických zařízeních:

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. Energie elektromagnetického pole se mění v kinetickou energii tepelného pohybu atomů a molekul látky. Obecně mluvíme o množství tepla a o proudění tepla. Díky tomu, že v elektrizačních systémech vytváříme elektrické pole, k čemuž nám slouží elektromagnetická indukce, můžeme později elektrickou energii přeměnit v kinetickou energii mechanického pohybu těles a konat tak práci. Část energie se během tohoto děje přemění v teplo. Tato energie pro nás tvoří ztráty. Jedná se vlastně o energii neuspořádaného pohybu elementárních částic. [3]

1.1 Druhy ztrát

1.1.1 Výkonové ztráty ΔP

Jsou to tepelné ztráty vznikající průchodem elektrického proudu, které jsou závislé na zatížení (na odběru proudu). Tyto ztráty můžeme vyjádřit vztahem pro jednu fázi:

$$\Delta P = R \cdot I^2 \quad (1.1)$$

Výkonové ztráty se měří při zkratovaném sekundárním vinutí (zapojení nakrátko = do zkratu) a při napájení stroje sníženým napětím na takovou úroveň, aby proud odpovídal jmenovitému proudu (nebo se na tyto podmínky následně přepočítávají). [2]

1.1.1.1 *Odpor vodiče*

Měrný odpor neboli rezistivita je fyzikální veličina charakterizující vodivostní či odporové vlastnosti látek, které vedou elektrický proud. Pro určení tepelných ztrát ve vodiči Q je nutné znát odpor vodiče. Za předpokladu, že proud je rozložen rovnoměrně po konstantním průřezu vodiče, platí:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.2)$$

Velikost odporu vodiče není konstantní, ale je ovlivněna teplotou okolí. Při průchodu proudu dochází k oteplení vodiče a k růstu jeho odporu až do dosažení rovnovážného stavu. Základní hodnota elektrického odporu daného materiálu se uvádí při 20°C, součinitel α charakterizuje závislost změny s měnící se teplotou.

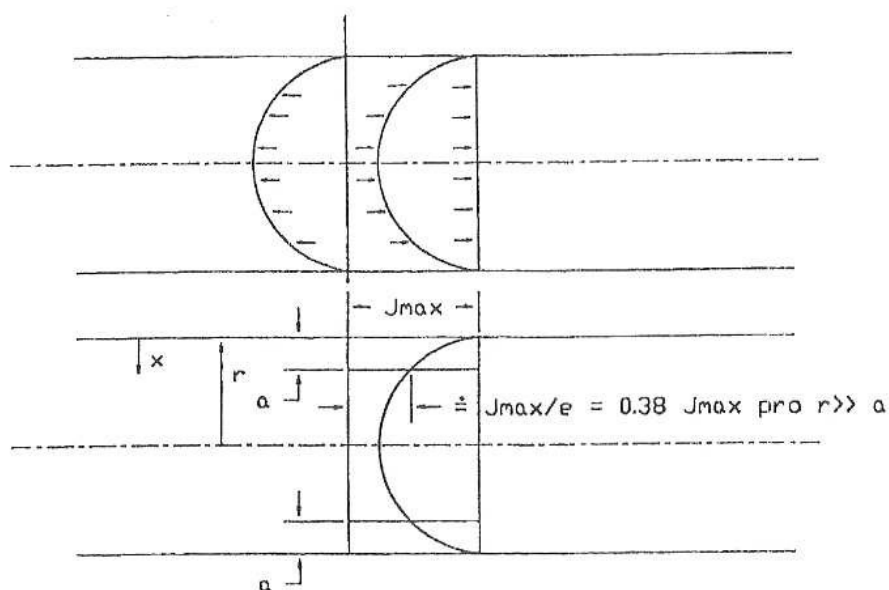
Teplotní závislost odporu vodiče:

$$R_{\vartheta} = R_{20} (+\alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad (1.3)$$

[3,7]

1.1.1.2 *Odpor vodiče při střídavém proudu*

U střídavého proudu dochází v průřezu vodiče k nerovnoměrnému rozložení hustoty proudu J . Vzniká takzvaný skinefekt, kdy následkem indukce vlastním střídavým magnetickým polem ve vodiči je proud vytlačován k povrchu vodiče.



Obr. 1 Rozložení hustoty proudu ve válcovém vodiči plného průřezu

Rozložení hustoty proudu ve válcovém vodiči můžeme vyjádřit:

$$J = J_{max} \frac{e^{-\frac{x}{a}}}{\sqrt{1 - \frac{x}{r}}} \quad (1.4)$$

Kde

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

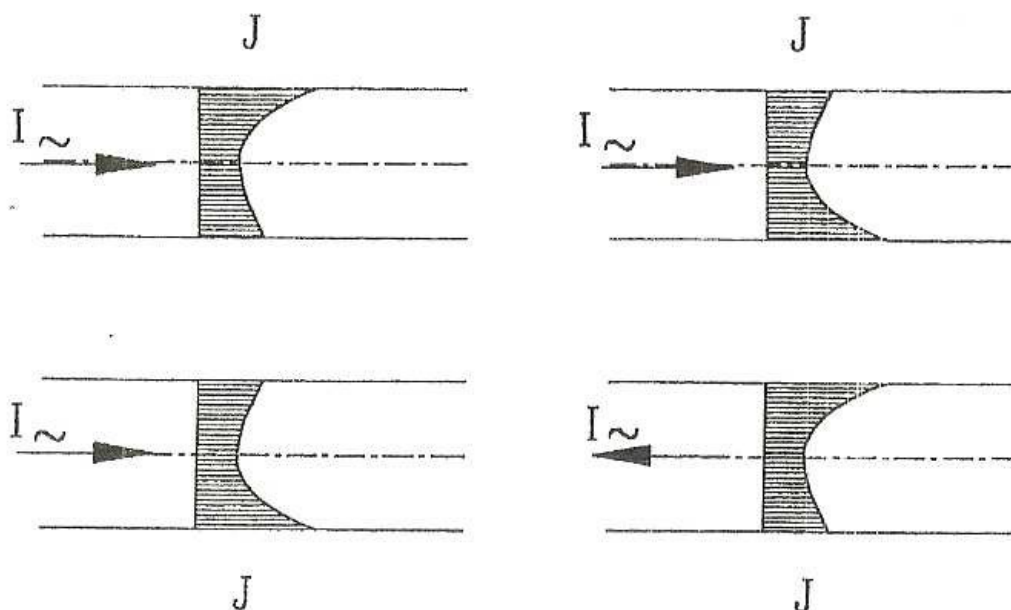
Pro určení maximální hustoty proudu na povrchu vodiče, kde $r \geq 4a$, použijeme přibližný výpočet:

$$J_{max} = \frac{I}{2\pi r a (1 - \frac{a}{2r})} \quad (1.6)$$

Zhuštění proudu do povrchové vrstvy závisí na úhlovém kmitočtu střídavého proudu. Pro frekvenci 50 Hz je u běžných technických materiálů jako Cu a Al hloubka vniku 10 mm. Pro pozorování skin efektu je tedy potřeba mít vodič s průměrem mnohem větším než 10 mm. Skin efekt také zvětšuje odpor vodiče procházejícího střídavým proudem, který je větší, než když stejným vodičem prochází proud stejnosměrný. Je to dáno nevyužitou částí vodiče:

$$R_{\approx} = k_{zh} \cdot R_{=} \quad (1.7)$$

U střídavého proudu může dojít u paralelních vodičů také k jevu blízkosti, kde je proud vytlačován do odlehlejších partií průřezu vodičů, pokud je směr proudu vodičů shodný a pokud je proud opačný, bude vytlačován do přilehlých částí vodičů.



Obr. 2 Jev blízkosti

Odpor vodiče dopočítáme:

$$R_{\approx} = \rho_{rf}(1 + \alpha_1 \Delta\vartheta) \frac{l}{S} k_{zh} k_{bl} \quad (1.8)$$

[3]

1.1.2 Ztráty v železe ΔP_{Fe}

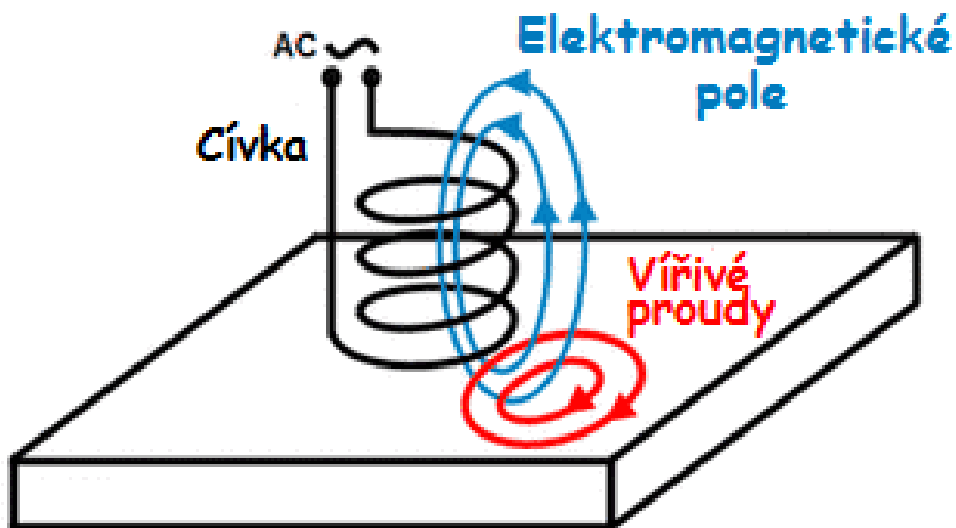
Tyto ztráty jsou měřeny při chodu stroje naprázdno. Celkové ztráty v železe jsou dány dvěma složkami:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeV} + \Delta P_{FeH} \quad (1.9)$$

Ztráty v železe, na rozdíl od výkonových ztrát, nejsou závislé na odběru proudu.[2]

1.1.2.1 Ztráty vířivými proudy ΔP_{FeV}

Jestliže se v okolí objemových vodičů mění magnetický indukční tok, potom v těchto vodičích vznikají vířivé (Foucaultovy) proudy. V takových případech mají charakter proudových smyček, které jsou kolmé na směr magnetického toku.



Obr. 3 Znáornění vířivých proudu

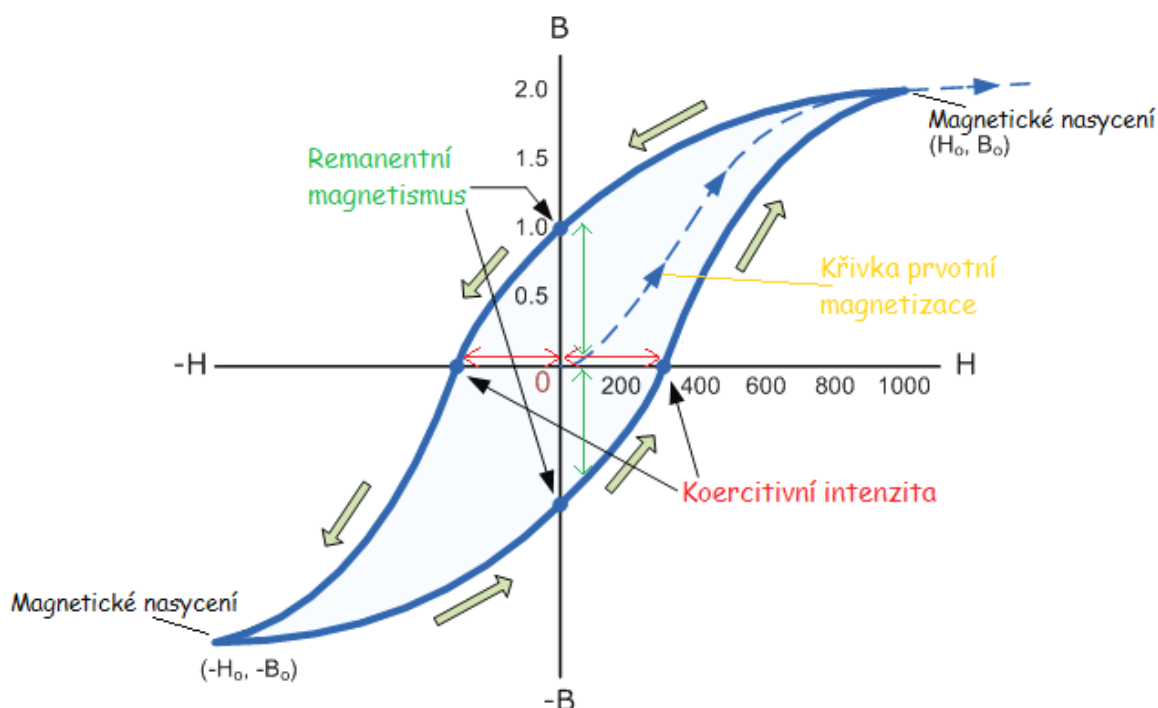
Ztráty vířivými proudy můžeme přibližně vyjádřit vztahem:

$$\Delta P_{FeH} \approx B^2 \cdot f^2 \quad (1.10)$$

Pro omezení vířivých proudů se magnetické obvody střídavých strojů nestaví z jednoho masivního kusu železa, ale skládají se z tenkých plechů, které jsou vzájemně izolovány. Tím se výrazně sníží v kolmém směru jejich vodivost. Rovněž se železo leguje křemíkem za stejným účelem. Tímto se sníží jeho elektrická vodivost, zatímco magnetická vodivost zůstane nezměněná.[2]

1.1.2.2 Ztráty hysterezní ΔP_{FeH}

Hysterezní smyčka v podstatě vyjadřuje vliv působení magnetického pole na magnetický materiál. Získá se provedením jednoho tzv. cyklu magnetování. U střídavého napájení se v čase mění směr a velikost proudu, mění se tedy také směr a velikost magnetického toku. Tím dochází k neustálému přemagnetování železa (podle hysterezní smyčky). Během jedné periody u střídavého napájení se v železném jádře odehrají změny odpovídající jedné hysterezní smyčce. K takovému neustálému přemagnetování železa je nutné vynaložit energii - takto tedy vznikají hysterezní ztráty.[2]



Obr. 4 Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu

1.1.3 Dielektrické ztráty

Tyto ztráty jsou příčinou změny fázového úhlu mezi napětím a proudem. Při působení elektrického pole na dielektrikum se část elektrické energie přemění v teplo, kterým se dielektrikum ohřívá. Příčinou dielektrických ztrát jsou pohyby volných a vázaných nosičů elektrického náboje v materiálu.

Celkové ztráty dielektrik jsou součtem vodivostních, polarizačních a ionizačních ztrát. Vodivostní ztráty závisí na vnitřní a vnější povrchové vodivosti a vyskytují se u všech dielektrik. Jejich podstatou jsou srážky volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu látky. Polarizační ztráty jsou podmíněny polarizačními pochody v dielektriku. Velikost těchto ztrát a jejich teplotní a kmitočtové závislosti vycházejí z druhu vyskytujících se polarizací. Ionizační ztráty se vyskytují u plynů, a taky u tuhých a kapalných dielektrik, které obsahují plynové vměstky. Podmínkou vzniku ztrát je překročení prahu ionizace daného plynu.[8]

1.2 Oteplování proudovodiče

Prochází-li elektrický proud I (A) vodičem s odporem $R(\Omega)$, pak v každém časovém okamžiku dt vznikají ve vodiči tepelné ztráty:

$$dQ = Ri^2 dt \quad (1.11)$$

Toto teplo má dvě části. Jedna část se odvede ve stejné době do okolí ochlazováním. Je to množství $\alpha_0 A dt$. Druhá část tepla zůstává v tělese a zvyšuje jeho teplotu o $d\theta$. Teplo k tomu spotřebované určuje vztah $cV d\theta$. Platí tedy základní rovnice:

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Delta\vartheta dt + cV d\vartheta \quad (1.12)$$

Rovnici řešíme separací proměnných:

$$dt = \frac{cV}{RI^2 - \alpha_0 A \Delta\vartheta} d\vartheta \rightarrow t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \left[\frac{RI^2}{cV} - \frac{\alpha_0 A \Delta\vartheta}{cV} \right] + K \quad (1.13)$$

Integrační konstantu K stanovíme z počáteční podmínky: v okamžiku $t = 0$ je také oteplení $\Delta\vartheta = 0$

$$K = \frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \frac{RI^2}{cV} \quad (1.14)$$

Výsledné řešení rovnice:

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \left(1 - \frac{\alpha_0 A}{RI^2} \Delta\vartheta \right) \quad (1.15)$$

Rovnici antilogaritmujeme a vyjádříme explicitně okamžité oteplení:

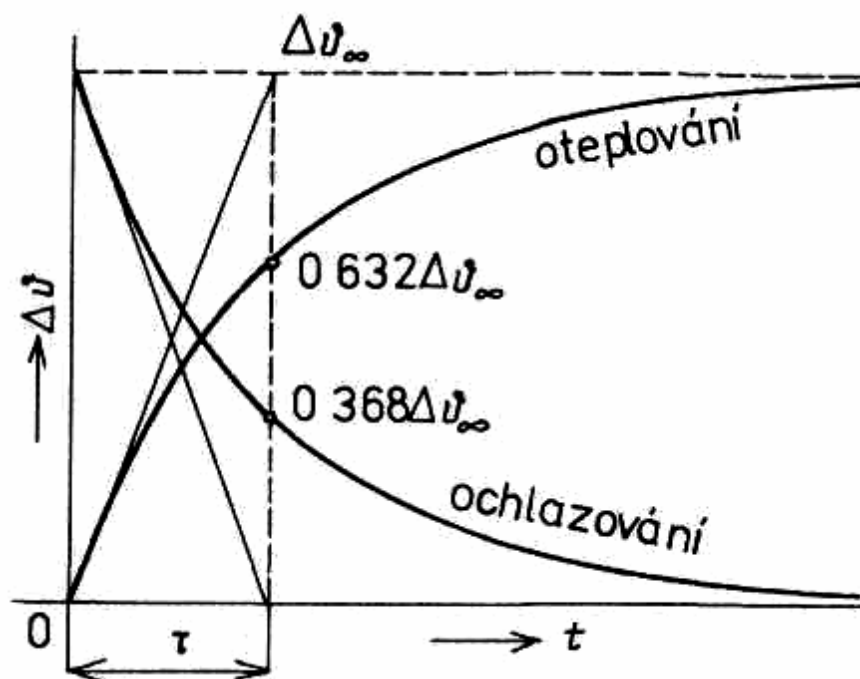
$$\Delta\vartheta = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \left(1 - e^{-\frac{\alpha_0 A t}{cV}} \right) = \Delta\vartheta_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (1.16)$$

Přitom jsme zavedli označení:

$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \quad (1.17)$$

$$\tau = \frac{cV}{\alpha_0 A} \quad (1.18)$$

Křivka časového průběhu oteplení má exponenciální charakter. Z počáteční nulové hodnoty roste stále pomaleji, až se za dobu $t \rightarrow \infty$ ustálí na hodnotě $\Delta\vartheta_\infty$, což je maximální oteplení. Časovou konstantu $\tau(s)$ lze definovat jako dobu, za kterou by těleso dosáhlo ustáleného oteplení $\Delta\vartheta_\infty$, kdyby se všechno uvolněné teplo spotřebovalo jen na zvyšování jeho teploty, tj. kdyby bylo $\alpha_0 = 0$. V grafickém zobrazení rovnice na následujícím obrázku vytíná velikost této tzv. časové konstanty τ na pořadnici $\Delta\vartheta_\infty$ tečna k oteplovací křivce v jejím počátku ($t = 0$).



Obr. 5 Oteplovací a ochlazovací charakteristika

Z rovnice také plyne, že za dobu $t = \tau$ od začátku průchodu proudu dosáhne vodič oteplení:

$$\Delta\vartheta_{\tau} = \Delta\vartheta_{\infty}(1 - e^{-1}) \doteq 0,632\Delta\vartheta_{\infty} \quad (1.19)$$

Při výpočtech jsme poměry idealizovali a předpokládáme, že se časová konstanta během oteplování nemění. To ve skutečnosti není úplně pravda, protože součinitel přestupu tepla α_0 je mírně závislý na oteplení $\Delta\vartheta$ a během oteplování se mění. Měnit se může poněkud i měrná objemová tepelná kapacita c . Proto zpravidla nesouhlasí zcela přesně měřená křivka s křivkou vypočítanou.

Prochází-li stále stejný proud vodičem po velmi dlouhou dobu, těleso dosáhne teplotně ustáleného stavu. V ustáleném stavu platí:

$$\frac{\Delta\vartheta}{dt} = 0, \Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\infty} \quad (1.20)$$

takže rovnice bude mít tvar:

$$RI^2 = \alpha_0 A \Delta\vartheta_{\infty} \quad (1.21)$$

Dosažením tohoto nejvyššího možného oteplení povrchu $\Delta\vartheta_{\infty}$ nastává za daných podmínek tepelná rovnováha. To znamená, že se veškeré teplo vznikající ve vodiči jeho povrchem předává do okolí (zpravidla do ovzduší). K bezpečnému a spolehlivému provozu zařízení, jehož součástí vodič je, nesmí toto oteplení přesáhnout teplotní odolnost použitých izolantů. Izolanty členíme z tohoto hlediska do sedmi tepelných tříd: Y, A, E, B, F, H a C.

Tab. 1 Teplotní klasifikace izolanů

Teplotní třída	Teplotní třída [°C]
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	Není teplotně omezená

Dovolená oteplení určitých částí proudových drah přístrojů jsou (podle materiálu a provedení) normami stanovována individuálně. Následkem těchto skutečností určují podmínky chlazení a materiál izolace velikost jmenovitého proudu daného zařízení. Proto jmenovitý proud definujeme jako proud, který může elektrickým zařízením trvale procházet, aniž oteplení kterékoli jeho části přestoupí dovolenou velikost.

Velikosti krajních dovolených teplot pro jednotlivé třídy izolanů byly stanoveny se zřetelem k hospodárné době života elektrických zařízení. Teplota vyvolává zejména v organických látkách určité nevratné změny materiálových vlastností, především elektrické a mechanické pevnosti, a tím omezuje jejich život. Krajiní dovolené teploty odpovídají době života asi 10 let při nepřerušovaném zatížení.[1]

1.3 Oteplování při přerušovaném chodu

Přerušíme-li obvod, vodičem přestane procházet proud: $I = 0$. Protože přístroj je předchozím průchodem proudu ohřátý, předává akumulované teplo dále do okolí. Tím se přístroj ochlazuje a jeho teplota klesá. Základní rovnice má nyní tvar:

$$0 = \alpha_0 A \Delta\vartheta dt + cV d\vartheta \quad (1.22)$$

Provedeme separaci proměnných a rovnici integrujeme

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \frac{\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta_1 + B} \quad (\Delta\vartheta_1 = 1K) \quad (1.23)$$

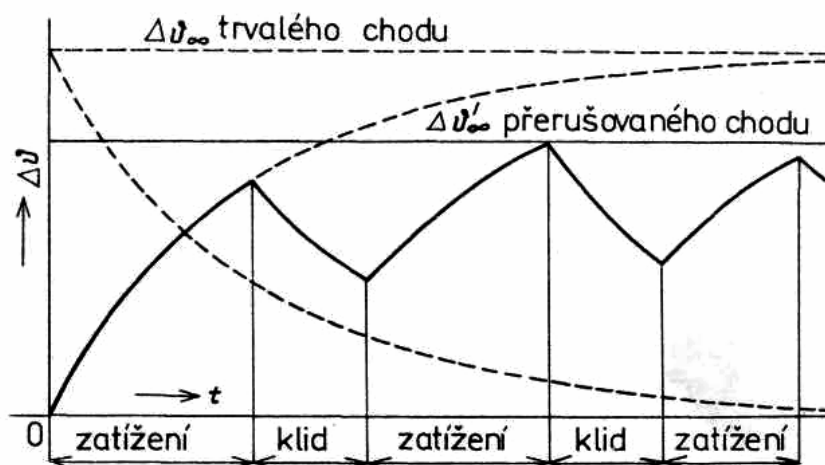
Integrační konstantu B určuje počáteční podmínka $t = 0, \Delta\vartheta = \Delta\vartheta_\infty$

$$B = \frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \frac{\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta_1} \quad (1.24)$$

Po dosazení a úpravě je řešení rovnice:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_\infty e^{-\frac{\alpha A t}{cV}} = \Delta\vartheta_\infty e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.25)$$

Jelikož časová konstanta τ je znova určena rovnicí (1.18), je ochlazovací exponenciála zrcadlovou křivkou ke křivce oteplovací.



Obr. 6 Oteplování při přerušovaném provozu

U zařízení, která mají provoz charakterizovaný dobami zatížení a klidu, nemusí proudová dráha nikdy dosáhnout ustáleného oteplení. Průběh oteplení se určuje nejlépe z oteplovací a ochlazovací křivky a časového programu chodu, jak je naznačeno na obr. 6.[1]

1.4 Krátkodobé oteplení

Prochází-li proud vodičem po dobu kratší než asi $0,2\tau$, můžeme zanedbat odvod tepla do okolí a uvažovat, že veškeré uvolněné teplo se akumuluje v tělese a zvyšuje jeho teplotu. Dostáváme pro velikost krátkodobého oteplení $\Delta\vartheta_{kd}$ za dobu t_{kd} při vstupní podmínce $t = 0$, $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\infty} = 0$ vztah:

$$\Delta\vartheta_{kd} = \frac{RI^2}{cV} t_{kd} \quad (1.26)$$

Pokud jde o vodič s délkou l a průřezem S můžeme vztah upravit:

$$\Delta\vartheta_{kd} = \frac{\rho l I^2}{c l S^2} t_{kd} = \frac{\rho}{c} \left(\frac{I}{S}\right)^2 t_{kd} = \frac{\rho \sigma^2}{c} t_{kd} \quad (1.27)$$

Tuto rovnici používáme nejčastěji. Počítáme oteplení v jediném průřezu. Jde-li o vodič konstantního průřezu, dostáváme oteplení pro celé těleso. Pokud se průřez vodiče mění, počítáme oteplení v místě nejmenšího průřezu.

Nejnepříznivější je případ zkratu po dlouhodobém průchodu jmenovitého proudu. Výsledná teplota proudové dráhy ϑ_{kd} je pak součet teplot okolí ϑ_0 , oteplení jmenovitým proudem $\Delta\vartheta_{\infty}$ a oteplení krátkodobého $\Delta\vartheta_{kd}$

$$\vartheta_{kd} = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_{\infty} + \Delta\vartheta_{kd} \quad (1.28)$$

Teplota $\Delta\vartheta_{kd}$ nesmí dosáhnout velikosti, při níž by se nebezpečně zmenšila mechanická pevnost materiálu vodiče, popřípadě by došlo k narušení izolantů, se kterými se vodič stýká.[1]

2 Metody měření teploty na elektrotechnických zařízeních

Problematika teplotních měření patří mezi velice důležité součásti diagnostiky elektrotechnických zařízení. Samotné měření teploty jako veličiny není v dnešní době problémem a k měření je k dispozici velké množství metod založených většinou na základních fyzikálních principech. Měření teplotních polí v elektrických strojích je specifickou problematikou vzhledem k jejich konstrukci. V elektrických strojích se objevuje velké množství fyzikálních jevů, které mohou působit na přesnost měření teploty nebo dokonce mohou způsobit poškození teplotních čidel. V elektrickém motoru se lze setkat s působením mechanických sil (otáčení rotoru motoru), elektromagnetických sil (ve vinutích) a samozřejmě teplotních polí.

Velký nárůst teploty může v motoru znamenat poškození izolace a tedy poškození stroje. U strojů s permanentními magnety může při dosažení Curieho teploty dojít k jeho demagnetizaci a zničení stroje.

Specifický problém je měření teplotních polí na rotujících částech. Je totiž nutné umístit teplotní čidlo na pohybující se část stroje tak, aby nedocházelo rotačním pohybem k uvolnění senzoru (vliv odstředivé síly). Dále pak na čidlo uvnitř elektrického stroje působí relativně velké magnetické pole, které může znamenat zanesení chyby do měření, například u termočlánku. Dalším problémem je vyvedení teplotního čidla z rotující části k měřicímu přístroji.

Z těchto důvodů vzniklo mnoho výpočetních metod pro určení oteplovacích a ochlazovacích charakteristik elektrického stroje. Hlavní nevýhodou těchto metod je relativní nepřesnost těchto výpočtů. Pro návrh elektrických strojů jsou ale tyto výpočty dostačující.[4]

2.1 Bezkontaktní měření

Bezkontaktní měření teploty je založeno na sledování povrchové teploty těles na základě elektromagnetického záření. Pomocí detektoru zpracováváme toto záření a zaznamenáváme jej v rozsahu vlnových délek od $0,4\mu\text{m}$ do $25\mu\text{m}$. Tento rozsah pokrývá velkou část infračerveného spektra a umožňuje měřit teploty v rozsahu od -40°C do $10\,000^{\circ}\text{C}$. Jelikož každý materiál vyzařuje jiným způsobem, tak je pro každý materiál stanovena veličina, která udává míru vyzařování povrchu tělesa. Existují tabulky hodnot emisivity pro jednotlivé materiály, ale je vhodné na počátku měření ověřit, zda tato hodnota odpovídá právě měřenému materiálu. Důvodem k tomu je, že se na materiálech (zvláště na kovech) mohou tvořit různé povrchové vrstvy a vlastnosti, které mají vliv právě na míru vyzařování. Povrchové vrstvy jsou například nátěr nebo koroze materiálu. Mezi povrchové vlastnosti patří například odrazivost povrchu, která může zapříčinit, že senzor zaznamená odraz zdroje tepla, který se nachází v blízkosti měřeného elektrického stroje, jak je naznačeno na obr. č.7.



Obr. 7 Odras tepla lidské ruky na lesklém povrchu stroje

Abychom zabránili tomuto problému, je možno použít několik metod. Za prvé můžeme natřít lesklý povrch matnou barvou. Tato metoda je jednoduchá a levná, ale může zapříčinit mnoho dalších problémů. K tomu je ještě velmi složité tento nátěr poté odstranit. Další metodou může být použití křídového spreje. Ten slouží k nanesení jemného křídového prášku na povrch stroje, a tím dojde k jeho zmatnění. Výhodou je snadná aplikace a povrchová vrstva je velmi tenká, má tedy skoro minimální vliv na teplotní pole. Nevýhodou naopak je, že každý sebemenší otěr znamená setření vrstvy materiálu. Z těchto důvodů je na začátku měření nutné určit emisivitu všech materiálů, které se na daném stroji nachází. Například při měření termokamerou je nejjednodušší způsob určení emisivity porovnání známé teploty s měřením pomocí termokamery. Tuto teplotu určím například pomocí dotykového teploměru. Následně je v softwaru, který umožňuje měnit emisivitu u termosnímku, provedená analýza. Uživatel následně provádí změnu nastavení emisivity, až se teplota změřena kontaktním teploměrem rovná teplotě změřené bezkontaktně.[4]

Pro bezkontaktní měření se využívají hlavně tyto dva typy měřicích přístrojů:

2.1.1 Pyrometry

Pyrometr slouží k rychlým a spíše orientačním měřením. Má jeden detektor uvnitř měřicího přístroje a pracuje na principu zaostření vyzařované teploty do tohoto detektoru. Přesnost dosažených výsledků je závislá na velké řadě parametrů (např. úhlu naklonění proti měřenému povrchu). Získání kvalitních výsledků vyžaduje určitou zkušenost s měřením tímto přístrojem. Díky svému jednoduchému ovládání se ale hodí pro přehledová měření, kde není zapotřebí velká přesnost.[4]



Obr. 8 Pyrometr

2.1.2 Termokamery

Termokamera zaznamenává celý povrch měřeného stroje do jednoho digitálního snímku. Snímek lze následně analyzovat pomocí speciálních programů. V programech lze měnit všechny parametry měření, a tedy provést důkladnou analýzu teplotního pole. Termosnímek se zaznamená v jediný časový okamžik. Následně je tedy možné, bez větších problémů, zjistit teplotu jednotlivých částí stroje v tomto čase.[4]



Obr. 9 Termokamera

Výhody bezkontaktního měření teploty:

- Možnost měřit teplotu celého povrchu v jednom okamžiku
- Možnost měření na pohybujících se objektech
- Malý vliv měřicího přístroje na měřený objekt
- Měření rychlých změn teploty

Nevýhody bezkontaktního měření teploty:

- Problémy s odrazem na lesklých částech
- Chyby měření způsobené prostupností prostředí
- Problém s určením správné emisivity povrchu

2.2 Kontaktní měření

Kontaktní měření teploty je založeno na principu přímého přenosu tepla z měřeného povrchu na měřicí sondu. Sonda může být realizována mnoha způsoby. Hlavní typy čidel, které lze použít pro měření v elektrických strojích, můžeme rozdělit do několika skupin podle provedení:

- Odporové senzory
- Termoelektrické senzory
- Indikátory teplot

Specifickým problémem tohoto měření je uchycení teplotního čidla na měřený povrch. Při použití například lepidla nebo speciálních materiálů může dojít k poškození čidla v případě, že je nutné čidlo odstranit. Zvláště termočlánky jsou náchylné na poškození tímto způsobem. Při krátkodobém měření můžeme použít k uchycení lepicí pásku, její plocha ale brání odvodu tepla a při dlouhodobějších měřeních je patrný rozdíl teploty pod touto páskou. [4]

Výhody kontaktního měření teploty:

- Nízká cena
- Nezávislost měření na povrchu stroje
- Možnost snadného umístění uvnitř i vně stroje
- Velká rychlost odezvy – v závislosti na čidle

Nevýhody kontaktního měření teploty:

- Nutnost vyvedení připojovacích vodičů
- Komplikované měření na pohyblivých částech stroje
- Někdy nutnost zasáhnout do konstrukce stroje – např. vrtání otvoru

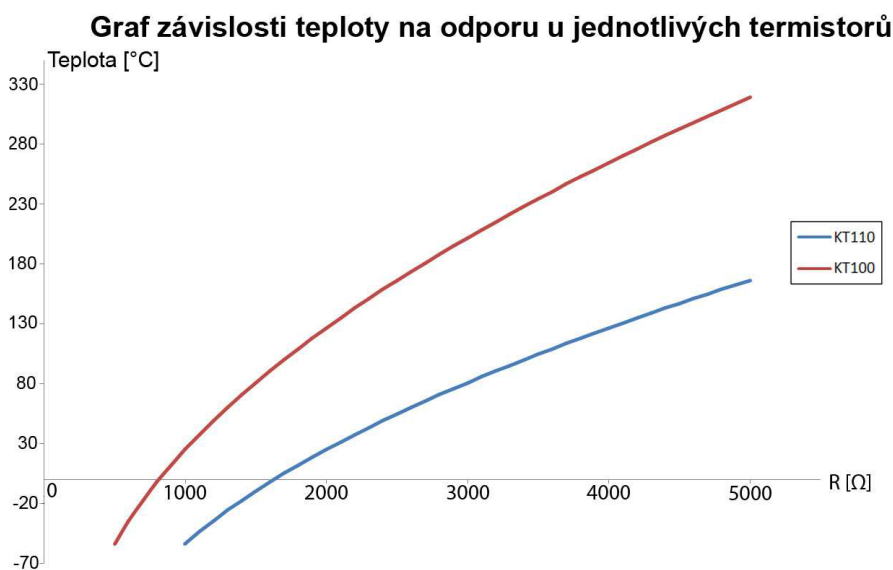
2.2.1 Odporové senzory

Tento druh čidel je založen na jednoduchém principu změny odporu jednotlivých látek v závislosti na teplotě. U vodivých materiálů dochází k růstu odporu s teplotou. Naopak u polovodičů s rostoucí teplotou dojde ke snížení odporu materiálu. Hlavní výhodou odporových teplotních čidel je dostatečná přesnost a velmi dobrá časová stabilita měřených hodnot.

Odporové senzory můžeme rozdělit podle konstrukčního uspořádání do dvou skupin:

- **Kovové odporové senzory** – principem těchto senzorů je teplotní závislost odporu kovu. Senzory můžeme podle materiálu rozdělit do několika hlavních skupin:
 - platinové senzory
 - niklové senzory
 - měděné senzory
- **Polovodičové odporové senzory** – využívají stejně jako odporové senzory teplotní závislost odporu. U polovodičových materiálů je dominantní závislost koncentrace nosičů náboje na teplotě. Mezi polovodičové odporové teplotní senzory patří:
 - Termistory
 - Negastory
 - Pozistory
 - Polovodičové monokrystalické senzory teploty
 - Monokrystalické Si senzory
 - Senzor SiC

Hodnoty teploty, které odpovídají příslušnému odporu, lze získat pomocí informací, které výrobci dodávají k jednotlivým čidlům. Většinou se jedná o tabulky, grafy nebo rovnice. Tyto vztahy po dosažení zjištěné hodnoty odporu aproximují průběh křivky změny odporu v závislosti na teplotě. Výsledkem těchto vztahů je teplota.[4]



Obr. 10 Graf závislosti teploty na odporu pro termistory KT100 a KT11

2.2.2 Termoelektrické senzory

Termočlánky se skládají ze dvou pásků nebo drátů. Ty jsou realizovány z různých kovů, které jsou spojeny na jednom konci. Při změně teploty na spoji dojde ke změně termoelektrické síly mezi dvěma konci. S růstem teploty také vzrůstá výstupní termoelektrická síla. Tato závislost není lineární.

Princip termočlánu vychází ze Seebeckova jevu, který je po svém objeviteli takto nazván. Ten popisuje převod tepelné energie na energii elektrickou. Tento jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii, a proto difundují do chladnějších míst ve větším množství než nositele z chladnějších míst do teplejších. Tím vzniká jednostranná převaha kladných nebo záporných nábojů a proto znaménka absolutních Seebeckových koeficientů souhlasí se znaménkem těch nositelů nábojů, kterých je ve vodiči více. Tento jev zajišťuje vlastní převod teploty na elektrické napětí.

Pro termoelektrické napětí, které vznikne na svorkách termočlánu, je možné psát tzv. Seebeckovy vztahy:

$$dE_{AB} = S_{AB} \cdot dT \quad (2.1)$$

Z toho:

$$E_{AB} = \int_{T_b}^{T_a} S_{AB} \cdot dT \quad (2.2)$$

Kde S_{AB} je Seebeckův koeficient, který se spočítá:

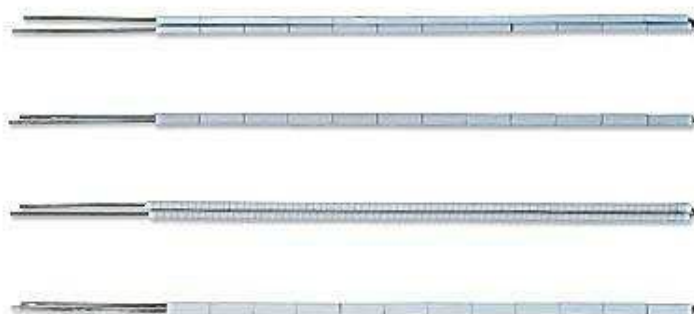
$$S_{AB} = S_A - S_B \quad (2.3)$$

A jednotlivé složky jsou pak určeny ze vztahů:

$$S_A = \int_0^T \frac{\sigma_A}{T} \cdot dT \quad (2.4)$$

$$S_B = \int_0^T \frac{\sigma_B}{T} \cdot dT \quad (2.5)$$

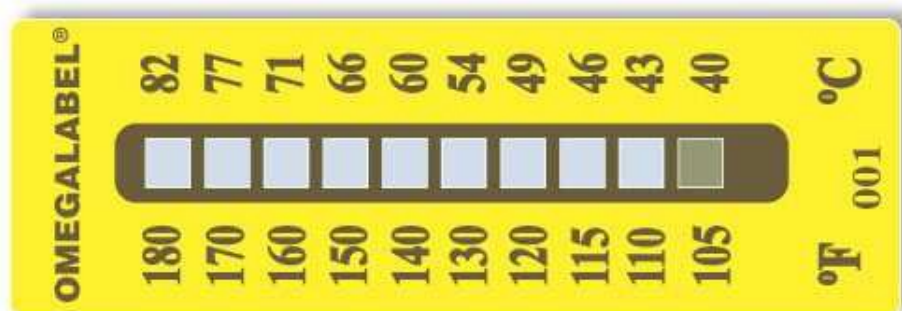
S využitím těchto vztahů je možné určit závislost termoelektrického napětí na teplotě, a tedy díky tomu lze pomocí termočlánu měřit teplotu.[4]



Obr. 11 Různé typy termočlánu

2.2.3 Indikátory teploty

Indikátory teploty slouží k přibližnému určení teploty těles. Teplota je stanovena na základě kritické teploty, při které nastává definována změna tvaru nebo barvy indikátoru. Přesnost měření teploty závisí na tom, nakolik se liší prostředí, ve kterém se indikátor kalibroval a na prostředí, ve kterém měření probíhá. Vliv na odchylky teploty má nejen složení atmosféry, ale také její tlak. Důležitým parametrem je pro používání těchto indikátorů rychlost ohřevu. Barevné indikátory se dělí na vratné a nevratné a s jedním nebo s více barevnými zvraty. Vratný indikátor má po zchladnutí výchozí barvu. Indikátor s více zvraty mění barvu při různých teplotách.[4]



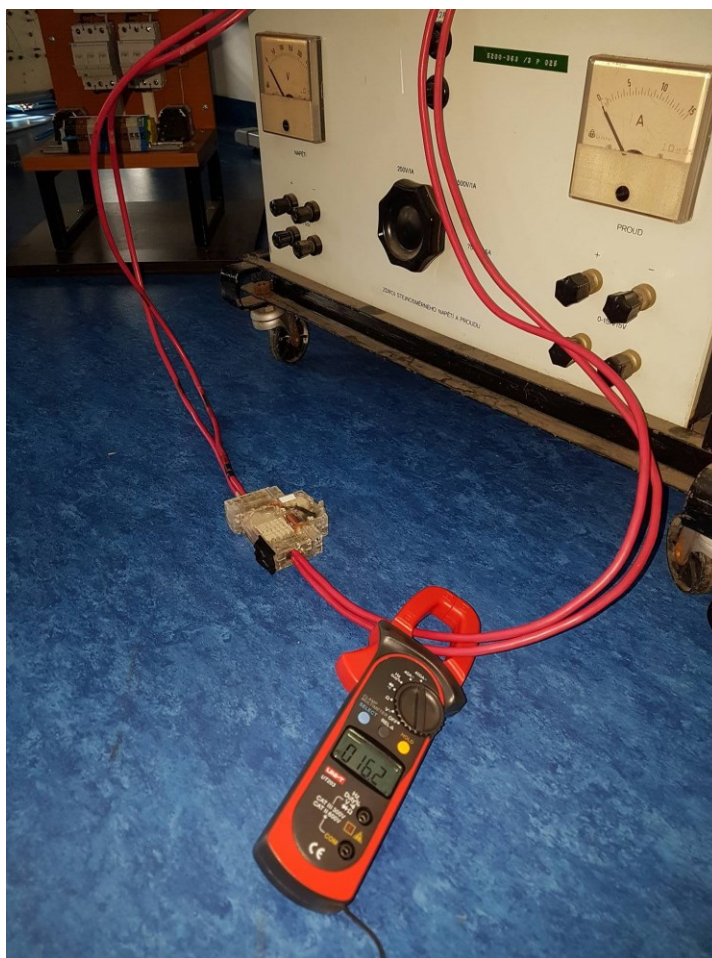
Obr. 12 Indikátor teploty

3 Praktické ověření vybraných metod na jističi nízkého napětí

Tento experiment se bude zabývat měřením teploty na jističi nízkého napětí. První metoda měření bude pomocí termokamery Flir T420. Druhé měření bude realizováno pomocí termočláнку.

3.1 Návrh pracoviště

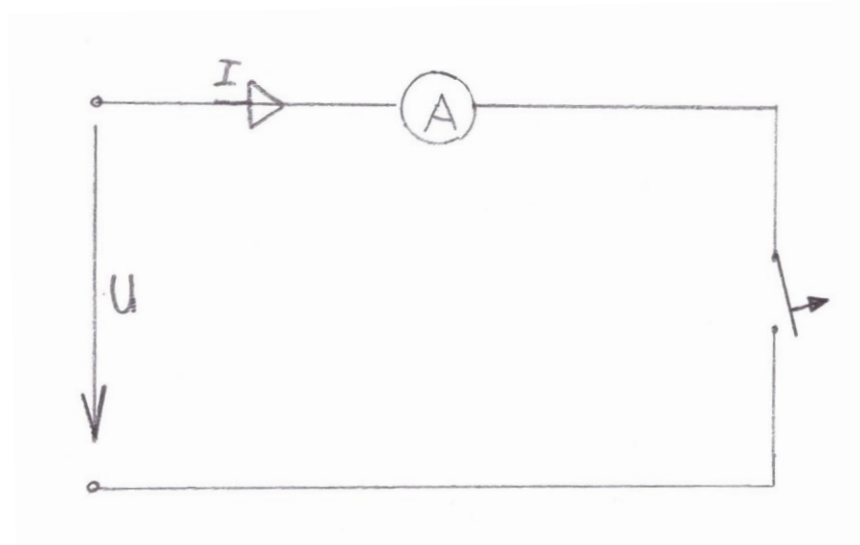
Měření oteplení jističe nízkého napětí bylo realizováno podle následujícího zapojení. Přívod do jističe byl napojen dvěma vodiči o průřezu 6mm^2 a délce kabelů 1m, naprosto stejným způsobem byl zapojen i odvod z jističe. Jistič se následně zatížil jmenovitým proudem.



Obr. 13 Zapojení pracoviště

3.2 Schéma zapojení

Obvod se zapojil podle následujícího schématu a byl napájen z laboratorního zdroje. Tento zdroj dodával jmenovitý proud 16A podle štítku na jističi nízkého napětí.



Obr. 14 Schéma zapojení

3.3 Měření oteplení pomocí termokamery

3.3.1 Flir T420

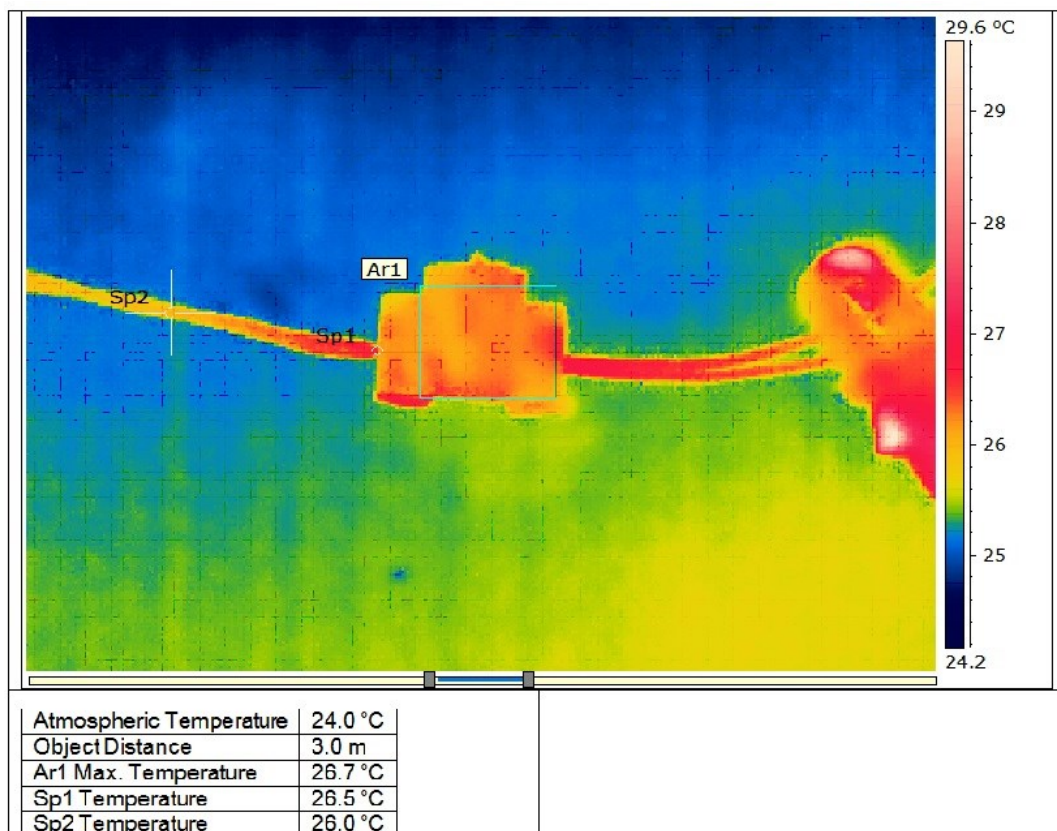
Termokamera vyšší střední třídy je určena pro diagnostiku elektrických rozvaděčů, výrobních strojů, motorů apod. S rozlišením senzoru 320x240 a výbornou teplotní citlivostí 0,04°C. Teplotní rozsah je -20°C až 650°C. Mezi další pokročilé funkce patří: ergonomicky naklopitelný objektiv s detektorem, autofokus, motorizované ostření apod.



Obr. 15 Termokamera Flir T420

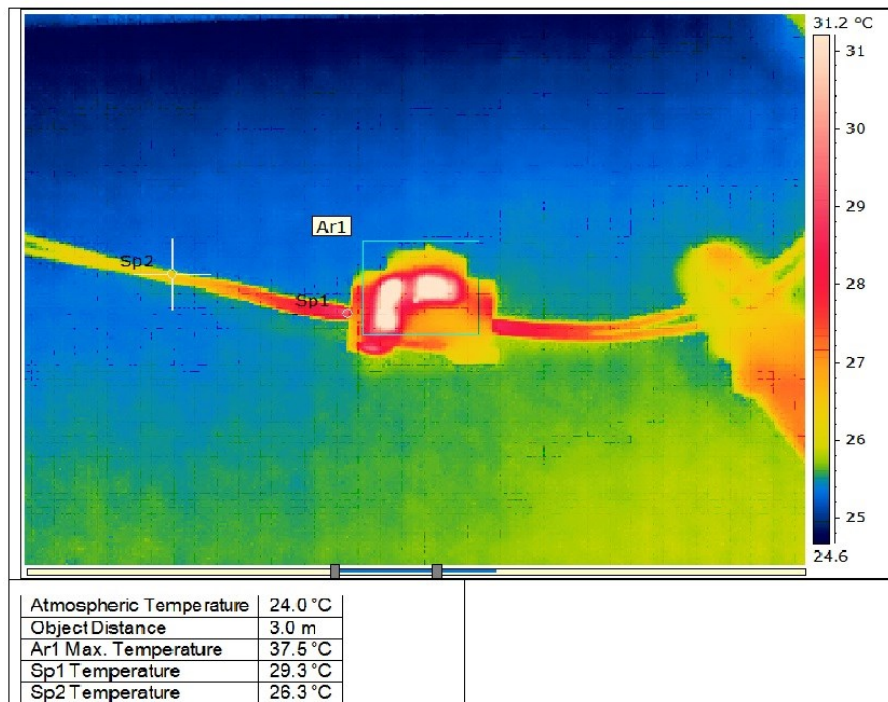
3.3.2 Měření oteplovacích křivek

Pro účely ověření zvolené metody bylo oteplování považováno za ustálené, pokud teplota nestoupala za následujících 5 minut o více než jeden stupeň Celsia. Měření probíhalo v laboratoři, kde teplota okolního vzduchu byla 24 °C. Pro měření oteplovacích křivek jsem vybral tři body: maximální teplotu jističe, svorku jističe a přívodní kabel ve vzdálenosti přibližně 10cm od svorky jističe. Analýzu termosnímku jsem provedl v programu Flir Reporter. Před průchodem proudu měl jistič teplotu 26,7 °C, svorka jističe 26,6 °C a přívodní kabel teplotu 26 °C.



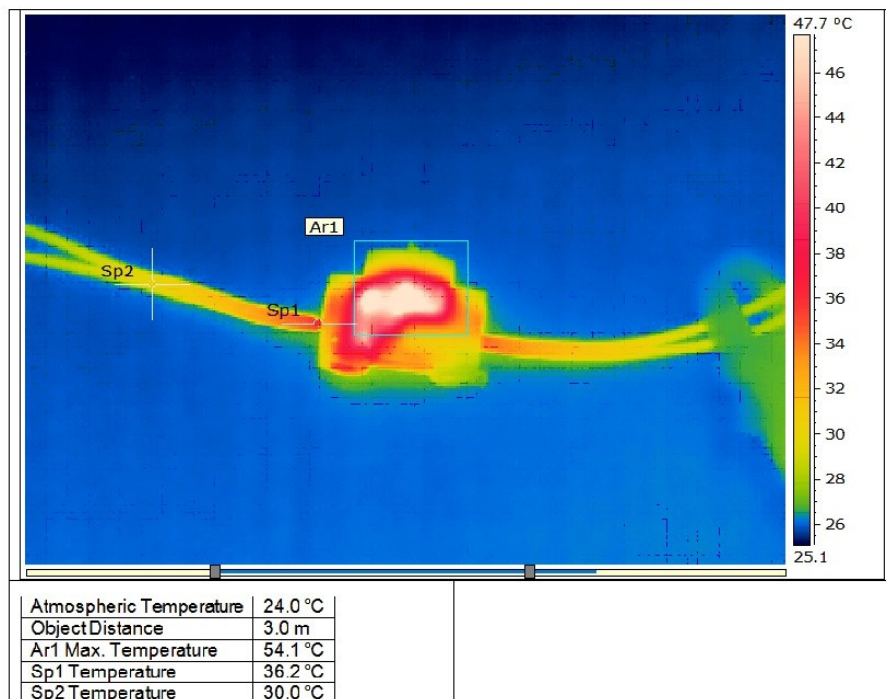
Obr. 16 Snímek z termokamery (t = 0s)

Po zapnutí zdroje začal jističem protékat jmenovitý proud 16A. Jistič se začal průchodem tohoto proudu oteplovat. Průběžně byly pořizovány termosnímky až do doby, kdy se teplota jističe ustálila.



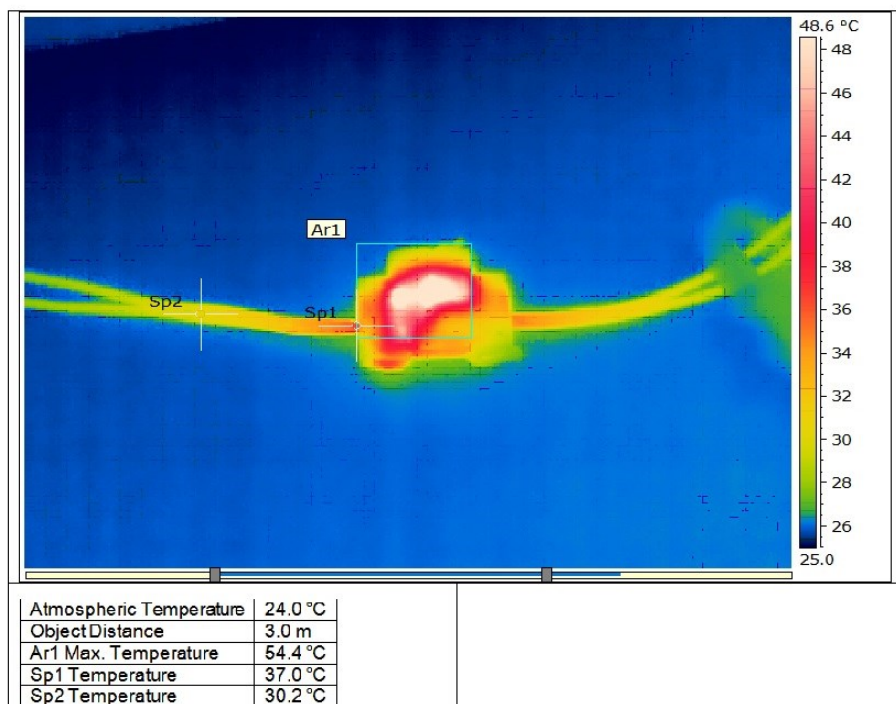
Obr. 17 Snímek z termokamery (t = 134s)

Po necelých patnácti minutách, kdy teploty rostly ze začátku rychle, se měřící body začaly ustalovat a během následujících pěti minut nevzrostly o více jak 1 °C.

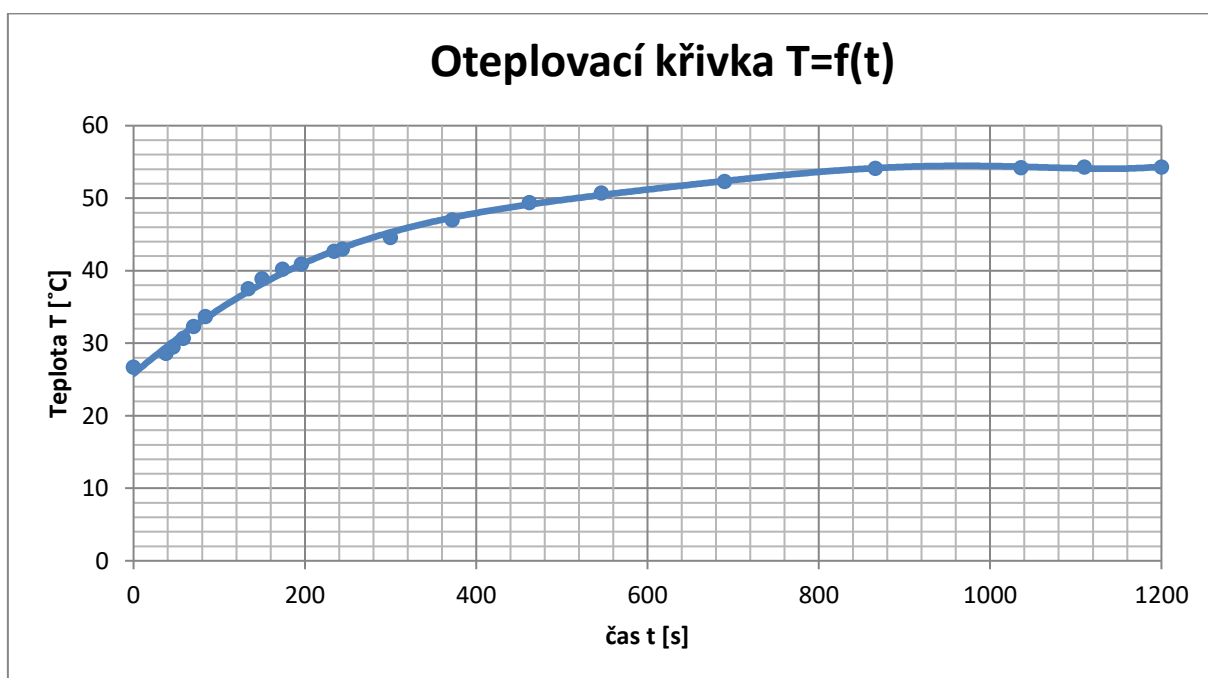


Obr. 18 Snímek z termokamery (t = 866s)

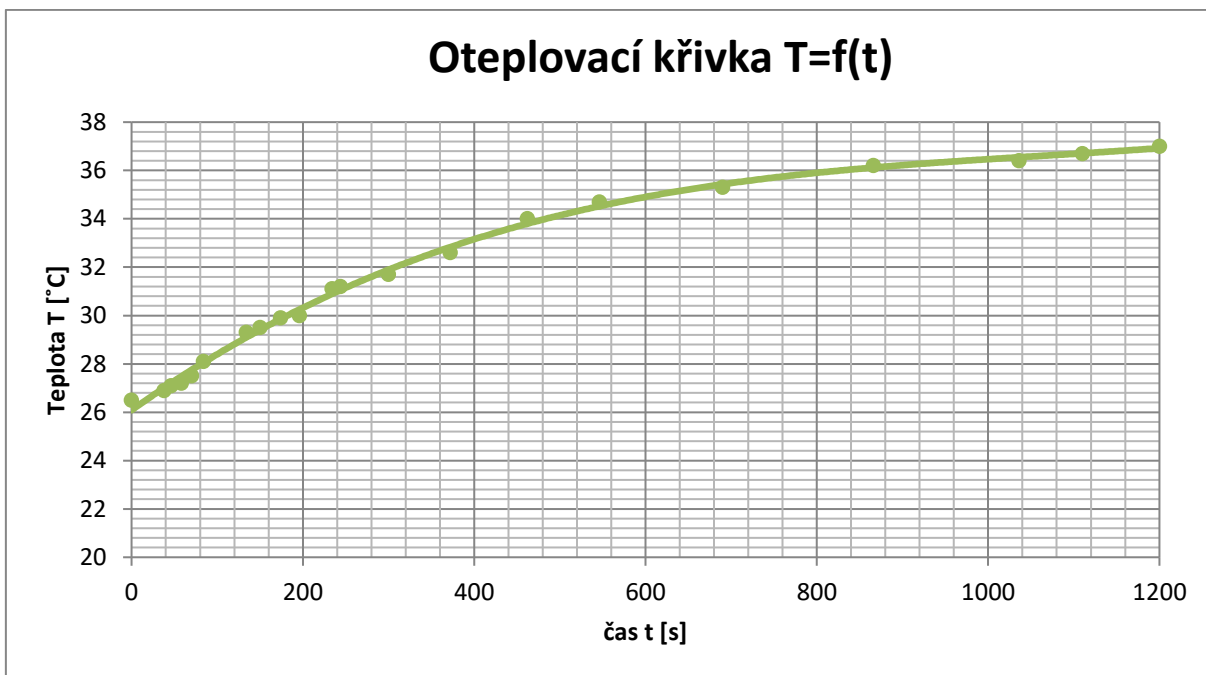
Po dvaceti minutách se teploty po průchodu jmenovitého proudu ustálily na teplotách - jističe 54,4 °C, svorky jističe 37 °C a přívodního kabelu 30,2 °C.



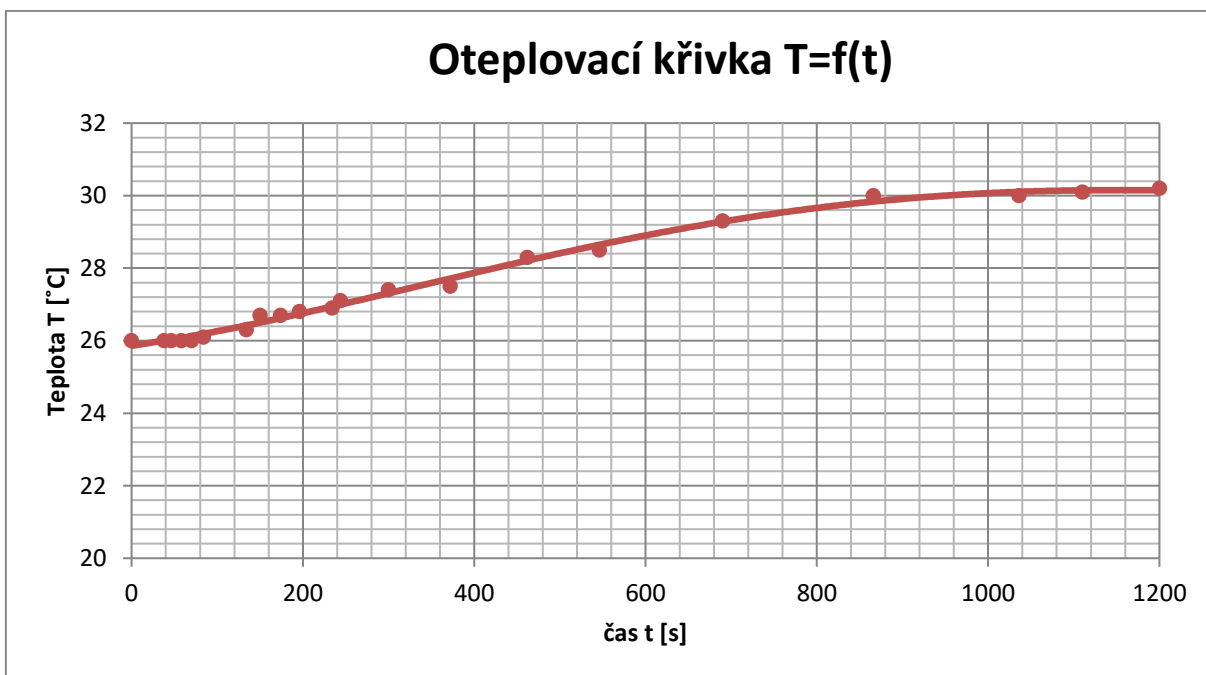
Obr. 19 Snímek z termokamery (t = 1200s)



Obr. 20 Oteplovací křivka nejteplejšího místa jističe



Obr. 21 Oteplovací křivka svorky jističe



Obr. 22 Oteplovací křivka kabelu

3.4 Měření oteplení pomocí termočlánku

3.4.1 Multimetr Voltcraft VC-155

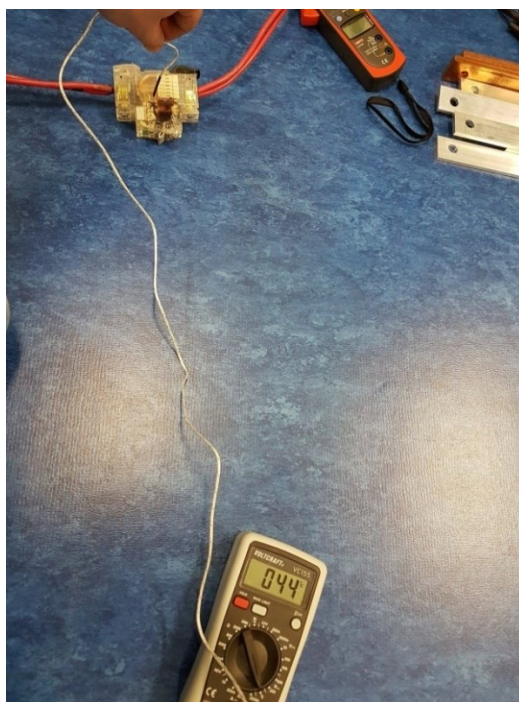
Odolný digitální multimetr s manuálním přepínáním rozsahu. Teplotní rozsah tohoto přístroje je -40 až 1000°C. Kontaktní měření se provádí pomocí termočlánku Chrom-hliník (K – typ). Na čtyřmístném displeji se zobrazují hodnoty teploty v celých číslech.



Obr. 23 Digitální multimetr Voltcraft VC-155

3.4.2 Měření oteplovacích křivek

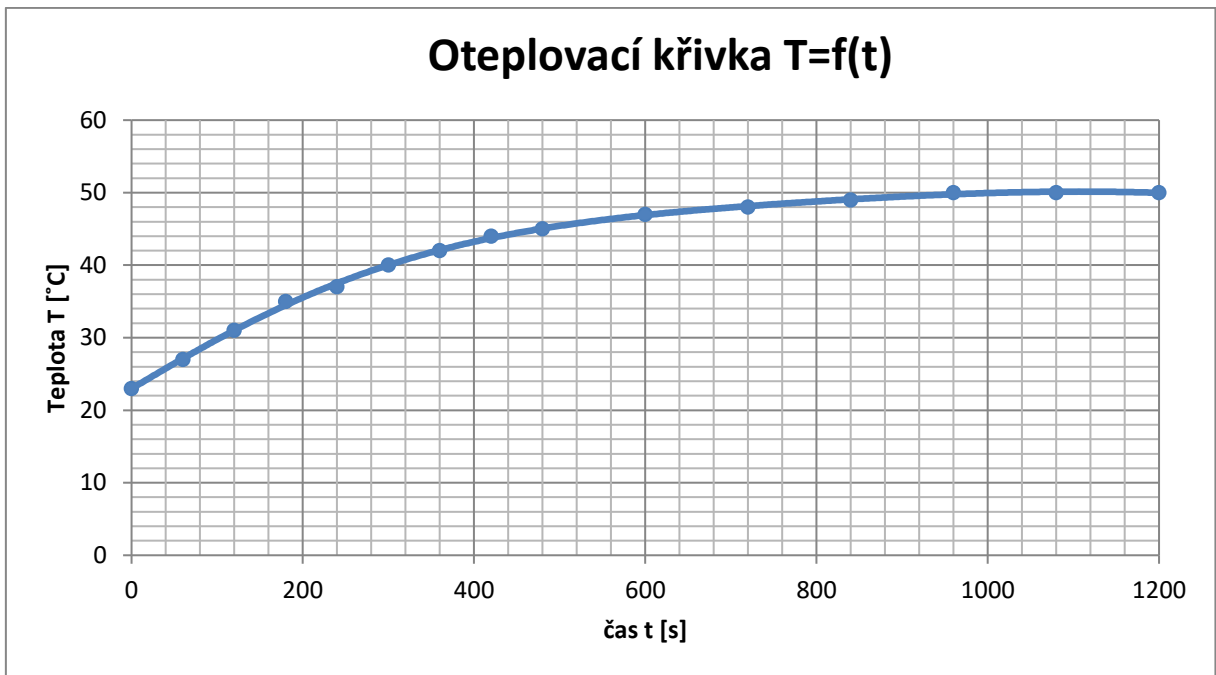
Měření termočlánkem probíhalo na stejném jističi se stejným zapojením, akorát v jiný den. Termočlánkem jsem při pravidelných intervalech měřil teplotu na třech stejných místech jako při měření termokamerou. Do předem připravené tabulky jsem zapisoval hodnoty z měření a vytvořil grafy oteplovacích křivek. Teplota vzduchu v místnosti byla 23 °C. Vlivem nutnosti přikládat čidlo na jednotlivé měřící body mohlo dojít k malé chybě měření vlivem toho, že jsem neustále vířil vzduch, a tím i nepatrně ochlazoval měřící body.



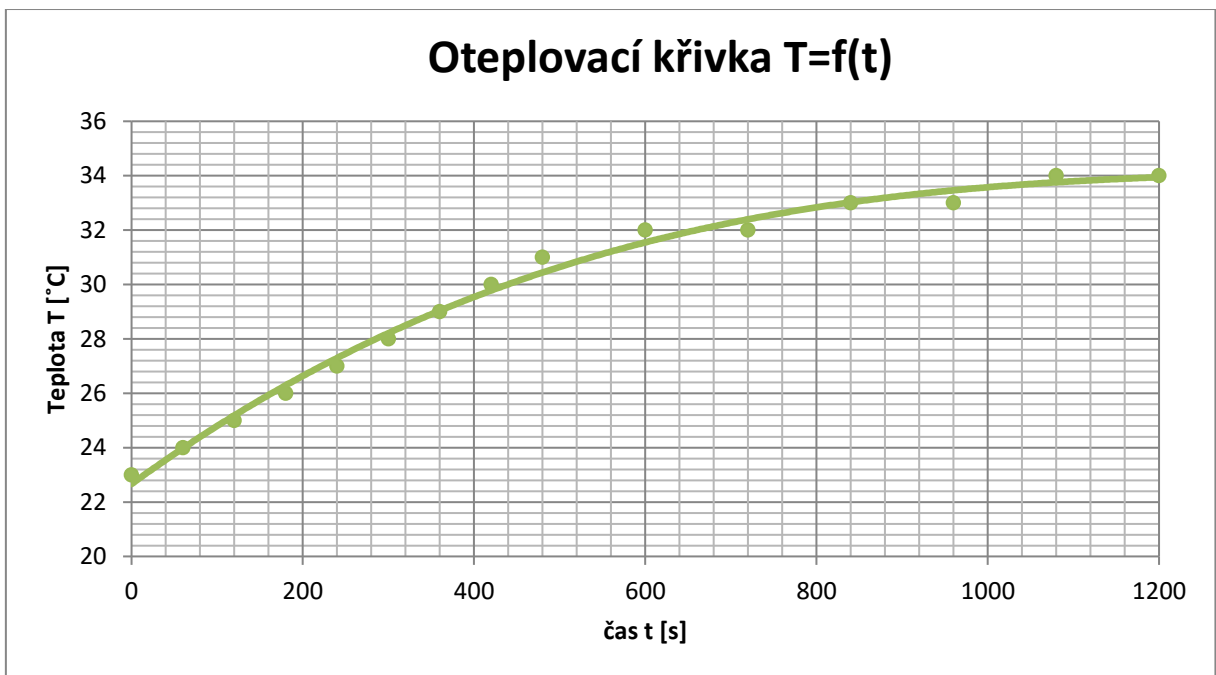
Obr. 24 Měření termočlánkem

Tab.2 Naměřené hodnoty pomocí multimetru Voltcraft VC-155

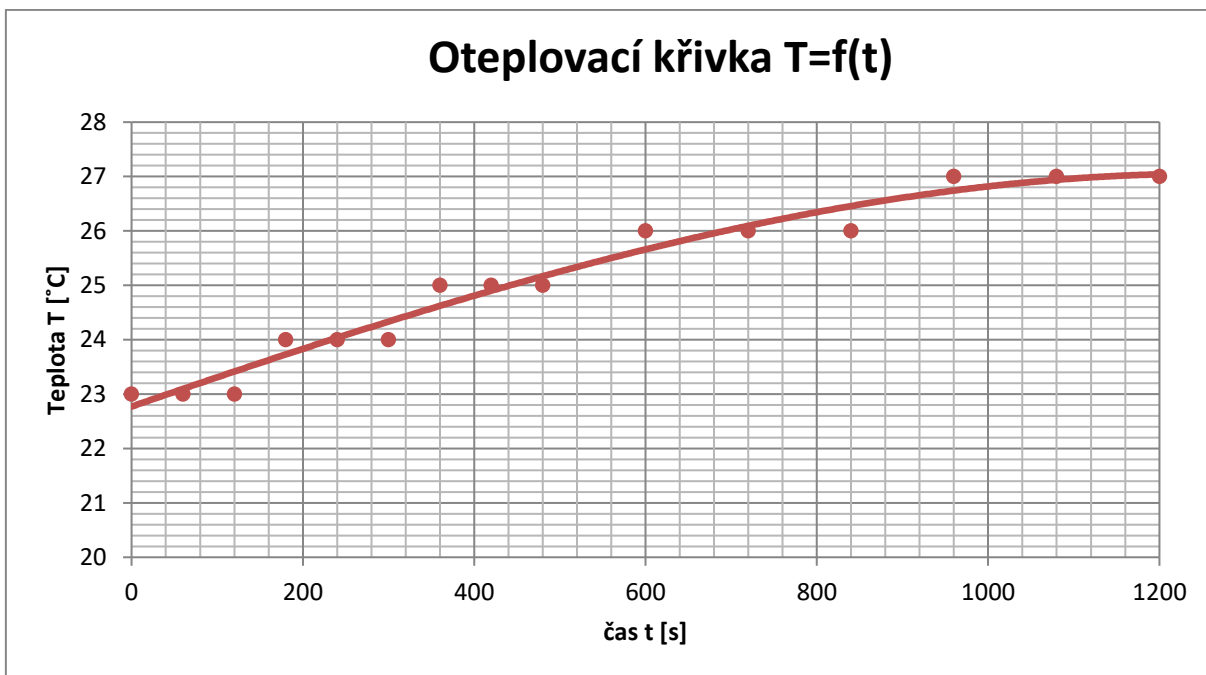
Čas	Teplota jistice	Teplota kabelu	Teplota svorky
[s]	[°C]	[°C]	[°C]
0	23	23	23
60	27	23	24
120	31	23	25
180	35	24	26
240	37	24	27
300	40	24	28
360	42	25	29
420	44	25	30
480	45	25	31
600	47	26	32
720	48	26	32
840	49	26	33
960	50	27	33
1080	50	27	34
1200	50	27	34



Obr. 25 Oteplovací křivka jističe

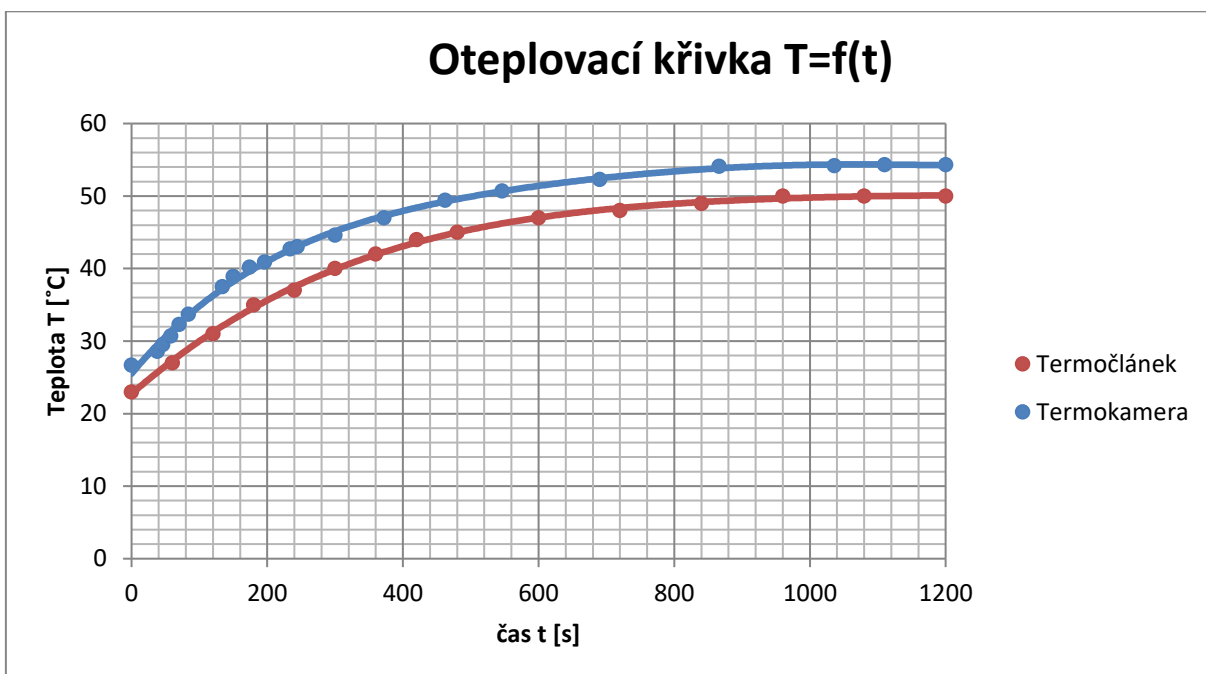


Obr. 26 Oteplovací křivka svorky jističe

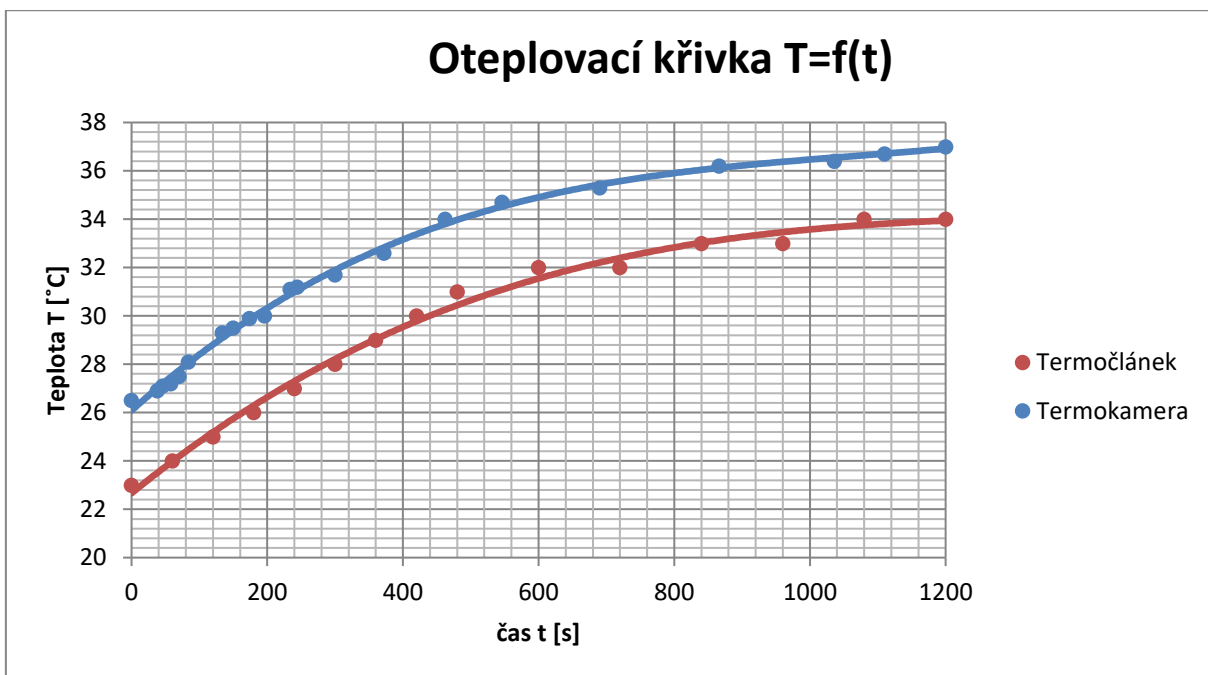


Obr. 27 Oteplovací křivka kabelu

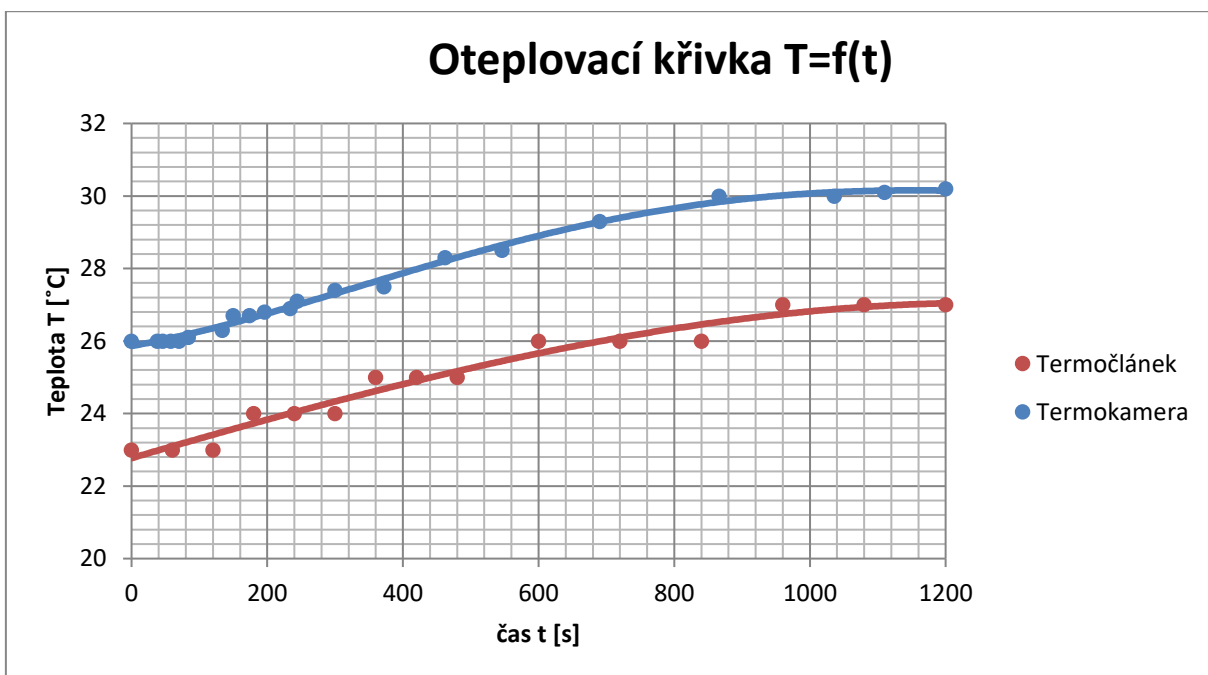
3.5 Srovnání dosažených výsledků



Obr. 28 Vzájemné porovnání oteplovacích křivek jističe



Obr. 29 Vzájemné porovnání oteplovacích křivek svorky



Obr. 30 Vzájemné porovnání oteplovacích křivek kabelu

Závěr

Měření teploty a oteplení v elektrických strojích a přístrojích je velmi důležitou diagnostickou problematikou. Díky znalosti teplotních pochodů uvnitř elektrických strojů lze modifikovat výrobní procesy, popřípadě i materiály, které se k výrobě využívají. K tomuto měření je možné použít celou řadu metod. V této práci jsem analyzoval dvě skupiny metod, a to měření bezkontaktní a měření kontaktní.

Pro praktické ověření různých metod měření teploty jsem měl na katedře z každé skupiny k dispozici jeden přístroj. Pro bezkontaktní měření jsem měl k dispozici termokameru Flir T420 a pro měření kontaktní multimetr Voltcraft VC-155 s termočlánkem chrom – hliník (K – typ). Měření těchto dvou metod probíhalo v jiných dnech. Jistič a zapojení zůstaly naprosto stejné. Při měření termokamerou jsem připravoval kabely a zapojoval jistič. Vlivem této práce se jistič a kabely ještě před průchodem jmenovitého proudu trochu zahřály a nemají tedy stejnou teplotu jako teplota okolí. Při měření termočlánkem bylo vše připraveno a jistič a kabely měly stejnou teplotu jako okolí. Další rozdíl mezi těmito metodami byl v teplotě okolí. Při měření termokamerou byla teplota okolí 24°C zatímco při měření termočlánkem 23 °C.

Výhoda měření termokamerou proti měření termočlánkem spočívá hlavně v rychlosti měření. Termosnímek se zaznamenává v jediný časový okamžik. Následně lze ve speciálních programech analyzovat tento snímek a měnit všechny parametry měření. Je tedy možné zjistit teplotu jednotlivých částí z jednoho termosnímku. Naopak nevýhoda je, že termokamera oproti termočlánku je relativně drahá. Přesnost měření také velmi závisí na znalostech a zkušenostech obsluhy. Určení emisivity povrchu může rovněž způsobit obtíže.

K výhodám měření termočlánkem patří nízká cena, velký teplotní rozsah a jednoduchost měření, kde nezávisí na povrchu stroje. Na druhou stranu k nevýhodám patří nutnost umístit čidlo na měřený objekt, kalibrace a náchylnost ke korozi.

Použitá literatura

- [1] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985. ISBN 04-529-85.
- [2] RUSNOK, Stanislav a Pavel SOBOTA. *Cvičení z Elektrických strojů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3288-3.
- [3] KOLÁŘOVÁ, Jana. *Analýza chlazení elektrického zařízení v rozvaděči*. Plzeň, 2012. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] JANDA, Marcel a Hana KUCHYŇKOVÁ. TEPLOTNÍ MĚŘENÍ V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH. *Elektrorevue*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008, (33), 8. ISSN 1213-1539.
- [5] GROSS, Boleslav. *Laboratorní a numerická cvičení z elektrických přístrojů*. Brno: VUT, 1983.
- [6] ARTBAUER, Otto. *Tepelný výpočet elektrických přístrojov*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1963.
- [7] LAZECKÝ, David. *Analýza a predikce ztrát na vedení PS*. Ostrava, 2016. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [8] RÁČEK, Tomáš. *Dielektrické vlastnosti epoxidové pryskyřice plněné nanočásticemi*. Brno, 2010. Vysoké učení technické v Brně.