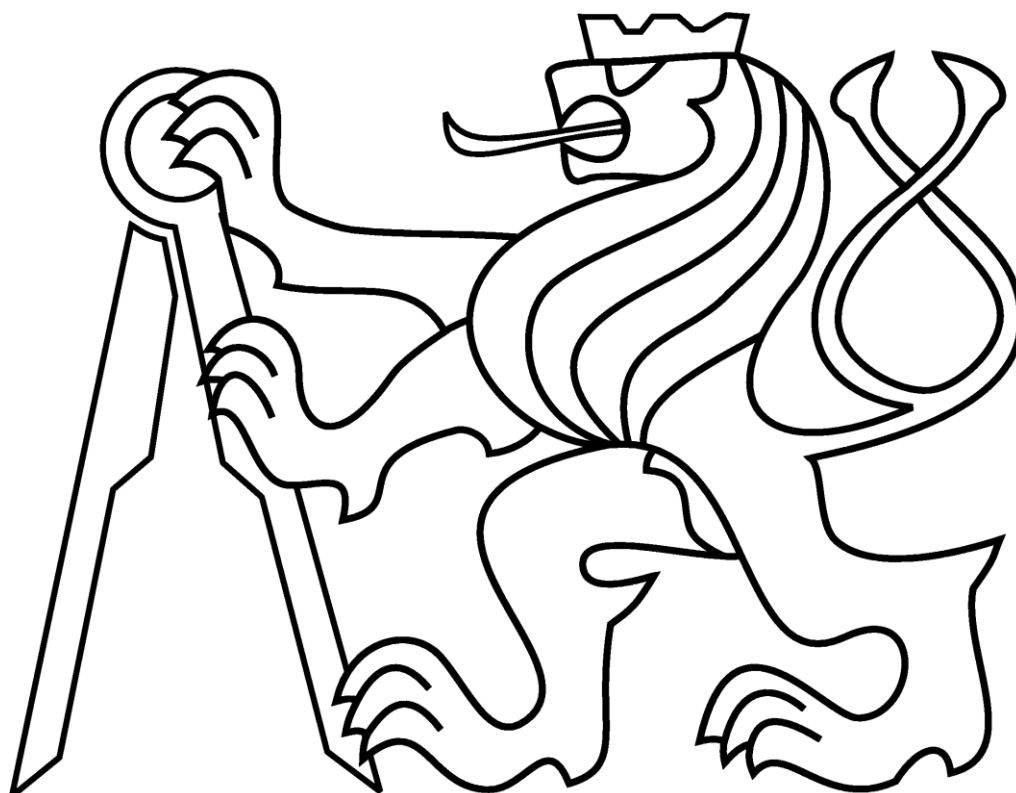


**České vysoké učení technické v Praze**

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Studium oteplení transformátoru

Praha 2015

Vladimír Moc

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Vladimír Moc**

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

Název tématu: **Studium oteplení transformatoru**

### Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s možnostmi měření teploty u transformátorů a s možnými způsoby chlazení.
- 2) Na modelových transformátorech změřte různými způsoby jejich oteplení.
- 3) Oteplení transformátorů změřte s ohledem na jejich zatížení a způsob ochlazování.
- 4) Výsledky experimentů vyhodnoťte.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Mentlík, V. a kol.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN-technická literatura, Praha 2008
- [2] Kopylov, I.P. a kol.: Stavba elektrických strojů, SNTL, Praha 1988
- [3] Sazima, S. a kol.: Sdílení tepla, SNTL, Praha 1993

Vedoucí: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 25. 3. 2015

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis transformátorů používaných v energetice a elektrotechnice. Hlavním cílem je ucelený souhrn jednotlivých typů transformátorů a jejich izolačního systému. Experimentální část je zaměřena na měření oteplení transformátoru a určení štítkových hodnot pomocí tepelné třídy izolačního systému.

## **Abstract**

The presented bachelor thesis is focused on the description of transformers which are used in the power engineering and electro technology. The main objective is a comparison of various types of transformers and their insulation system. The experimental part is focused on measuring of transformers temperature rise and defining rating plate data by using the maximal allowed heat of insulation system.

### Klíčová slova

Transformátor, teplota, oteplení, izolační systém, zkouška nakrátko, zkouška naprázdno

### Key words

Transformer, temperature, insulation system, short-circuit test, open-circuit test

## **Prohlášení**

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

V Praze dne 22. 5. 2015

Podpis autora .....

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Panu Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za nezměrnou trpělivost a toleranci, kterou se mnou měl. Dále bych chtěl poděkovat Panu doc. Ing. Janu Kubovi, CSc., za svůj čas co mi věnoval, za jeho neúnavné konzultace a poskytnuté zázemí pro experimentální zkoumání. Také děkuji svému kolegovi Vítu Zahradníkovi za pomoc ve chvíli nejvyšší nouze a své přítelkyni, berušce a rodině za neochvějnou podporu a pomoc při studiu.

## OBSAH

0.	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	8
0.1	ÚVOD.....	10
1.	TRANSFORMÁTORY.....	11
1.1.	Princip.....	11
1.2.	Konstrukční rozdělení.....	11
1.2.1.	Magnetický obvod.....	11
1.2.2.	Vinutí.....	12
1.2.3.	Ostatní konstrukční prvky.....	12
1.3	Náhradní schéma transformátoru.....	12
1.4.	Chod naprázdno.....	13
1.5.	Chod při zatížení.....	14
1.6.	Chod nakrátko.....	14
1.7	Dělení transformátorů.....	15
1.7.1	Lakované transformátory.....	16
1.7.2	Olejové transformátory.....	16
1.7.3	Zalévané transformátory.....	16
2.	TEPELNÉ VLASTNOSTI PLASTŮ.....	18
2.1	Trvalá tepelná odolnost.....	18
3.	ZPŮSOBY MĚŘENÍ TEPLoty.....	20
3.1.	Kovové odporové senzory.....	20
3.1.1	Platinové snímače teploty.....	20
3.1.2	Niklové snímače teploty.....	20
3.1.3	Měděné snímače teploty.....	21
3.1.4.	Konstrukce kovových odporových senzorů.....	21
3.2.	Polovodičové odporové senzory.....	21
3.2.1	Termistory.....	21
3.2.2	Negistory (NTC termistory).....	21
3.2.3	Pozistory (PTC termistory).....	22
3.3.	Monokrystalické senzory.....	22
3.3.1	Křemíkové senzory (Si).....	22
3.3.2	SiC senzory.....	22
3.4.	Termoelektrické články.....	23

3.4.1. Rozdělení termočlánků.....	23
3.4.2. Konstrukce termočlánků.....	24
3.5. Měření teploty Dotykovými teploměry.....	26
3.5.1. Měření teploty pevných objektů.....	26
3.5.2. Měření povrchové teploty pevných objektů.....	27
3.6. Bezdotykové měření teploty.....	27
3.6.1. Černé těleso.....	27
3.6.2. Termovize.....	27
3.7. Výběr měřicích metod.....	28
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	29
4.1. Teoretický úvod.....	29
4.2. Popis měření.....	29
4.2.1. Použité přístroje.....	29
4.2.2. Měření naprázdno.....	32
4.2.3. Měření při činné zátěži.....	35
4.2.4. Měření nakrátko.....	39
5. Zhodnocení.....	41
6. LITERATURA.....	43
7. PŘÍLOHY.....	44

## 0. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$e$	[V]	Elektromotorické napětí
$u_i$	[V]	Okamžitá hodnota indukovaného napětí
$\Psi$	[Wb]	Spřažený magnetický tok
$N$	[-]	Počet závitů
$\Phi$	[Wb]	Magnetický tok
$U$	[V]	Napětí
$I$	[A]	Proud
$R$	[ $\Omega$ ]	Odpor vinutí
$X_\sigma$	[ $\Omega$ ]	Rozptylová reaktance vinutí
$U_i$	[V]	Indukované napětí
$k$	[-]	Činitel vazby
$I_0$	[A]	Proud naprázdno
$I_{\mu 0}$	[A]	Magnetizační proud
$I_{fe0}$	[A]	Proud reprezentující ztráty v železe
$\Phi_{max}$	[Wb]	Maximální magnetický tok
$f$	[Hz]	Frekvence
$R_k$	[ $\Omega$ ]	Odpor nakrátko
$X_k$	[ $\Omega$ ]	Rozptylová reaktance nakrátko
$U_k$	[V]	Napětí nakrátko
$I_N$	[A]	Jmenovitý primární proud
$Z_k$	[ $\Omega$ ]	Impedance nakrátko
$\varphi_k$	[-]	účiník nakrátko
$R_T$	[ $\Omega$ ]	Odpor vinutí při oteplení zatížením
$R_0$	[ $\Omega$ ]	Odpor vinutí při teplotě okolí
$TKR_{Cu}$	[ $K^{-1}$ ]	Teplotní koeficient odporu mědi
$\Delta T$	[-]	Rozdíl teplot
$U_r$		Regulovaný zdroj napětí
$A$		Ampérmetr na primární straně
$W$		Wattmetr
$V$		Voltmeter
$H$	[ $Am^{-1}$ ]	Intenzita elektromagnetického pole



$U_0$	[V]	Napětí naprázdno
$B_{\max}$	[T]	Amplituda magnetické indukce v magnetickém obvodu
$S$	[VA]	Zdánlivý výkon
$T_0$	[°C]	Teplota okolí
$P_0$	[W]	Ztráty naprázdno
$P_{\text{Cu}}$	[W]	Ztráty v mědi
$P_{\text{fe}}$	[W]	Výkon reprezentující ztráty v železe
$T_k$	[°C]	Teplota termočlánku
$T_t$	[°C]	Teplota naměřená termokamerou

## 1. ÚVOD

Cílem bakalářské práce je seznámit se s problematikou transformátorů, chlazení a měření jejich teploty. Dále bude cílem změřit oteplení transformátorů různými způsoby s ohledem na jejich zatížení a způsob ochlazování.

V teoretické části bude probrána problematika principu, konstrukce a výpočtů transformátorů. Dále se teoretická část zaměří na tepelné vlastnosti plastů a dalších izolačních materiálů využívaných při konstrukci transformátorů. Konec teoretické části se práce bude zaměřovat vhodné způsoby měření teploty.

## 1. TRANSFORMÁTORY

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který je schopen měnit parametry elektrické energie při totožné frekvenci. Významnou roli představuje při přenosu a rozvodu elektrické energie. Pro přenos na velké vzdálenosti se jimi zvyšuje napětí a zmenšuje proud pro minimalizaci ztrát na vedení a tím se zvyšuje výkon, který je vedením přenášeno. U těchto netočivých strojů lze v určitých případech dosáhnout účinnosti až 98%. Nevyužívají se jen v uvedené oblasti, další oblast využití je např. v elektronických obvodech, regulačních zařízeních a dalších. Proto se vyrábějí v různých modifikacích od jmenovitých výkonů v řádech mVA pro elektroniku až po stovky MVA výkonových transformátorů. Vzhledem k tomu, že neobsahují pohyblivé komponenty, tak náklady na údržbu nejsou nikterak vysoké. Záleží, jaké požadavky na ně budou kladeny.

### 1.1. Princip

Funkce transformátoru plyne z Maxwell-Faradayova zákona o indukovaném napětí

$$-e = u_i = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.1.1)$$

Princip lze zjednodušeně popsat tak, že na primární (vstupní) vinutí je napájeno střídavým proudem a na sekundárním vinutí je připojena zátěž. Proud procházející primárním vinutím vybudí magnetický střídavý tok v uzavřeném magnetickém obvodu, který je magneticky spřažen se sekundárním (výstupním), případně s dalšími vinutími. Časovou změnou spřaženého magnetického toku  $\Psi$  se ve vinutích 2 a 3 indukují napětí dle rovnice 1.1.1.

### 1.2. Konstrukční rozdělení

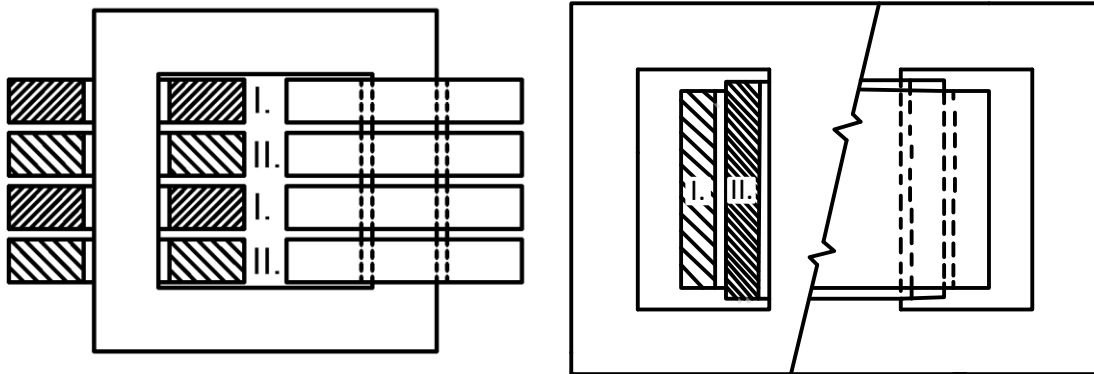
Transformátor lze rozdělit na tři základní části.

#### 1.2.1. Magnetický obvod

Slouží k uzavírání hlavního magnetického toku a je složen plechů pro elektrotechniku s tloušťkou od 0,28 až do 0,35 mm, navzájem izolovaných k omezení ztrát vířivými proudy. K jejich omezení slouží i zvětšení činného odporu plechů, čehož se dosahuje legováním křemíkem. Dalšího snížení ztrát v železe se dosahuje použitím orientovaných plechů válcovaných za studena, které mají podstatně menší hysterezní ztráty, jsou-li magnetovány ve směru válcování. Tvar plechů je dán konstrukčním uspořádáním obvodu. Existuje několik tvarů plechů jako: EI, EE, M, LL či UI plechy. Hlavní části magnetického obvodu jsou jádra s vinutím a magnetické spojky uzavírající magnetický obvod. Konstrukce magnetického obvodu může být jádrová s vinutími rozdělenými rovnoměrně na jednotlivá jádra a konstrukce plášťová s vinutími na vnitřním jádře (jádrech) a magnetický tok se uzavírá též postranními jádry bez vinutí, obvykle polovičního průřezu. Obě konstrukce jsou pro jednofázový transformátor na Obr. 1.2. [4]

### 1.2.2. Vinutí

Každá fáze má dvě či více vinutí, která jsou vzájemně magneticky vázána. Podle uspořádání mohou být vinutí řešena jako válcová (koncentrická, soustředná), kdy každé vinutí tvoří válec po celé výšce jádra, nebo jako desková (též kotoučová či prostřídaná), kdy se cívky primárního a sekundárního vinutí ve směru osy jádra střídají, viz Obr 1.2. [4]



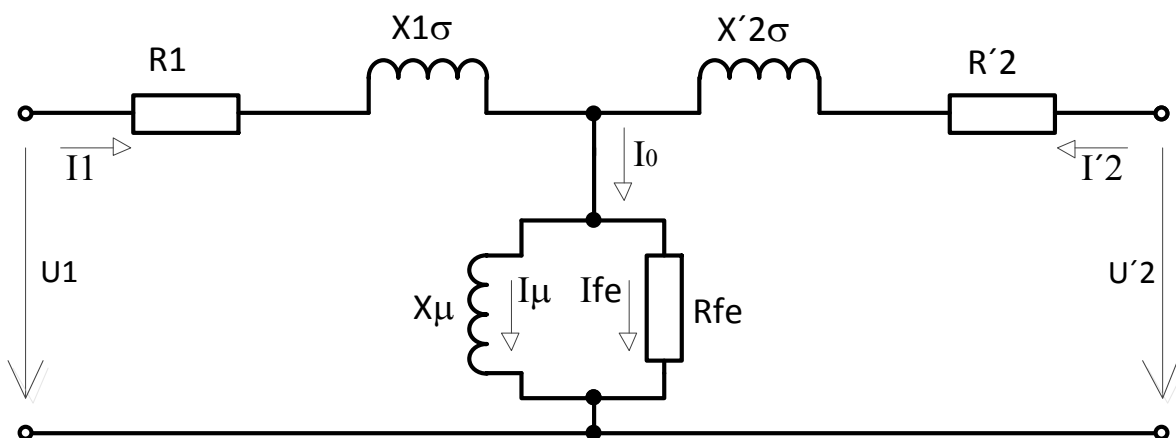
Obr. 1.2 Uspořádání jádrového transformátoru s deskovým vinutím (vlevo) a plášťového transformátoru s válcovým vinutím (vpravo).

### 1.2.3. Ostatní konstrukční prvky

Do této části se řadí součásti pro uchycení, průchodky a svorkovnice pro vodiče, díly pro možnost přepravy a v neposlední řadě izolační systém s nádobou. Nádoba se využívá pouze u transformátorů chlazených olejem, v němž je transformátor ponořen. Více o transformátorech chlazených olejem v kapitole 1.7.2.

### 1.3 Náhradní schéma transformátoru

Transformátor si lze představit jako kombinaci pasivních prvků (odporů a indukčností) Obr. 1.3.1, jejichž vlastnosti a parametry s jistým zjednodušením odpovídají vlastnostem transformátoru.



Obr. 1.3.1 Náhradní schéma transformátoru pro harmonické napětí

V elektrotechnice je zvykem zavádět komplexní vstupní napětí  $\hat{U}_1$  harmonické závislé na čase, kde je místo amplitudy zavedena efektivní hodnota. Obširnější rozbor i s přepočtem parametrů náhradního schématu, jehož výsledkem jsou rovnice 2.3.1 a 2.3.2 naleznete v[4].

$$\hat{U}_1 = R_1 \hat{I}_1 + jX_{1\sigma} \hat{I}_1 + \hat{U}_i \quad (1.3.1)$$

$$\hat{U}'_2 = -R_2 \hat{I}'_2 - jX'_{2\sigma} \hat{I}'_2 + \hat{U}_i, \quad (1.3.2)$$

K základním parametrům také patří převod transformátoru  $k$ , je to poměr indukovaných napětí.

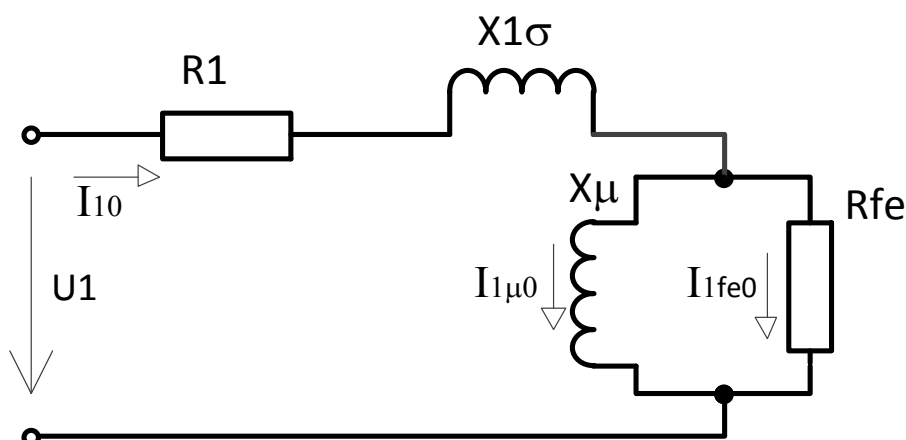
$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.3.3)$$

#### 1.4. Chod naprázdno

Pokud rozpojíme sekundární vinutí a primární vinutí připojíme ke zdroji střídavého napětí a ampérmetrem změříme protékající proud cívkou. Tento proud se nazývá proudem naprázdno  $I_{10}$ . Proud naprázdno se skládá z proudu magnetizačního  $I_{1\mu 0}$  a proudu reprezentující ztráty v železe  $I_{1fe0}$  viz vzorec 1.4.1.

$$\hat{I}_{10} = \hat{I}_{1\mu 0} + \hat{I}_{1fe0} \quad (2.4.1)$$

Magnetizační proud  $I_\mu$  způsobuje v magnetickém obvodu buzení toku  $\Phi$ , protože magnetický obvod má nenulový magnetický odpor. Při magnetizaci střídavým magnetickým polem v něm vznikají ztráty, které jsou způsobené hysterezí a vířivými proudy. Pokrytí ztrát v magnetickém obvodu zajišťuje ztrátový proud  $I_{1fe0}$ . Ztráty způsobené hysterezí a vířivými proudy tzv. ztráty v železe se v magnetickém obvodu přeměňují na teplo a oteplují transformátor. Proud naprázdno  $I_{10}$  bývá malý, protože ho tvoří především magnetizační proud, který je při uzavřeném magnetickém obvodu taktéž malý. Při jmenovitém vstupním napětí bývá asi jen 4 až 5 %, u malých transformátorů pak může být velikost 10 až 20% jmenovitého primárního proudu. Skutečný primární proud při zatížení transformátoru je pak větší o hodnotu proudu  $I_{10}$ .



Obr. 1.4.1 Náhradní schéma pro chod naprázdno

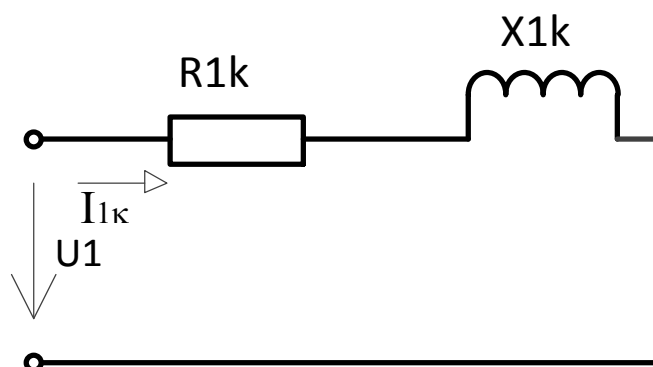
## 1.5. Chod při zatížení

Pokud je na sekundárním vinutí připojena zátěž, začne protékat proud, který budí v jádře vlastní magnetický tok  $\phi_2$ . Jádrem začne procházet výsledný magnetický tok  $\phi$ , vzniklý působením obou vinutí. Uzavřený magnetický obvod umožní, aby vinutí měla společnou osu a magnetická vazba byla co nejlepší. Většinou bývá sekundární napětí menší než primární. Indukované napětí je závislé právě na maximální velikosti magnetického toku  $\phi_{max}$ , frekvenci  $f$  a počtu závitů  $N$ . Vzorci 1.5.1. a 1.5.2. plynou z Maxwell-Faradayova zákona o indukovaném napětí 1.1.1. a následném převedení do Gaussovy roviny. Podrobnější informace o úpravách lze nalézt v [4].

$$U_{i1} = 4,44 \cdot N_1 f \phi_{max} \quad (1.5.1)$$

$$U_{i2} = 4,44 \cdot N_2 f \phi_{max} \quad (1.5.2)$$

## 1.6. Chod nakrátko



Obr. 1.6.1 Náhradní schéma transformátoru nakrátko

Ve skutečném transformátoru má primární i sekundární cívka činný odpor  $R_{1k}$  skládající se z odporů primárního  $R_1$  a sekundárního vinutí  $R_2$  a rozptylovou indukčnost  $X_{1k}$  skládající se z indukčnosti primárního  $X_{1\sigma}$  a sekundárního vinutí  $X'_{2\sigma}$ . Činný odpor cívky v transformátoru způsobuje Jouleovy ztráty (oteplování vinutí transformátoru). Rozptylová indukčnost reprezentuje rozptylové magnetické toky  $\Phi$ , které se uzavírají mimo spřažený magnetický tok  $\psi$  (velikost je dána konstrukcí transformátoru). Dohromady činný odpor a rozptylová reaktance tvoří impedanci vinutí  $Z$ , kterou lze zjistit pomocí měření nakrátko. Svorky sekundárního vinutí se zkratují a na primární vinutí se připojí na regulovatelný zdroj napětí, viz Obr. 1.6.1. Postupným zvyšováním napětí se nastaví jmenovitý primární proud a toto napětí se nazývá napětí nakrátko  $U_{1k}$  dle vzorce 1.6.1. Pomocí Ohmova zákona se vypočítá impedance vinutí.

$$U_{1k} = (R_{1k} + jX_{1k})I_{1N} = Z_{1k}I_{1N} \quad (1.6.1)$$

Hodnoty  $R_{1k}$  a  $X_{1k}$  lze určit pomocí zdánlivého  $S$  a činného výkonu  $P$  zjištěných při měření nakrátko, pomocí kterých se vypočte  $\cos \phi_k$  respektive  $\phi_k$ . Ze vztahů 1.6.2 a 1.6.2 se určí

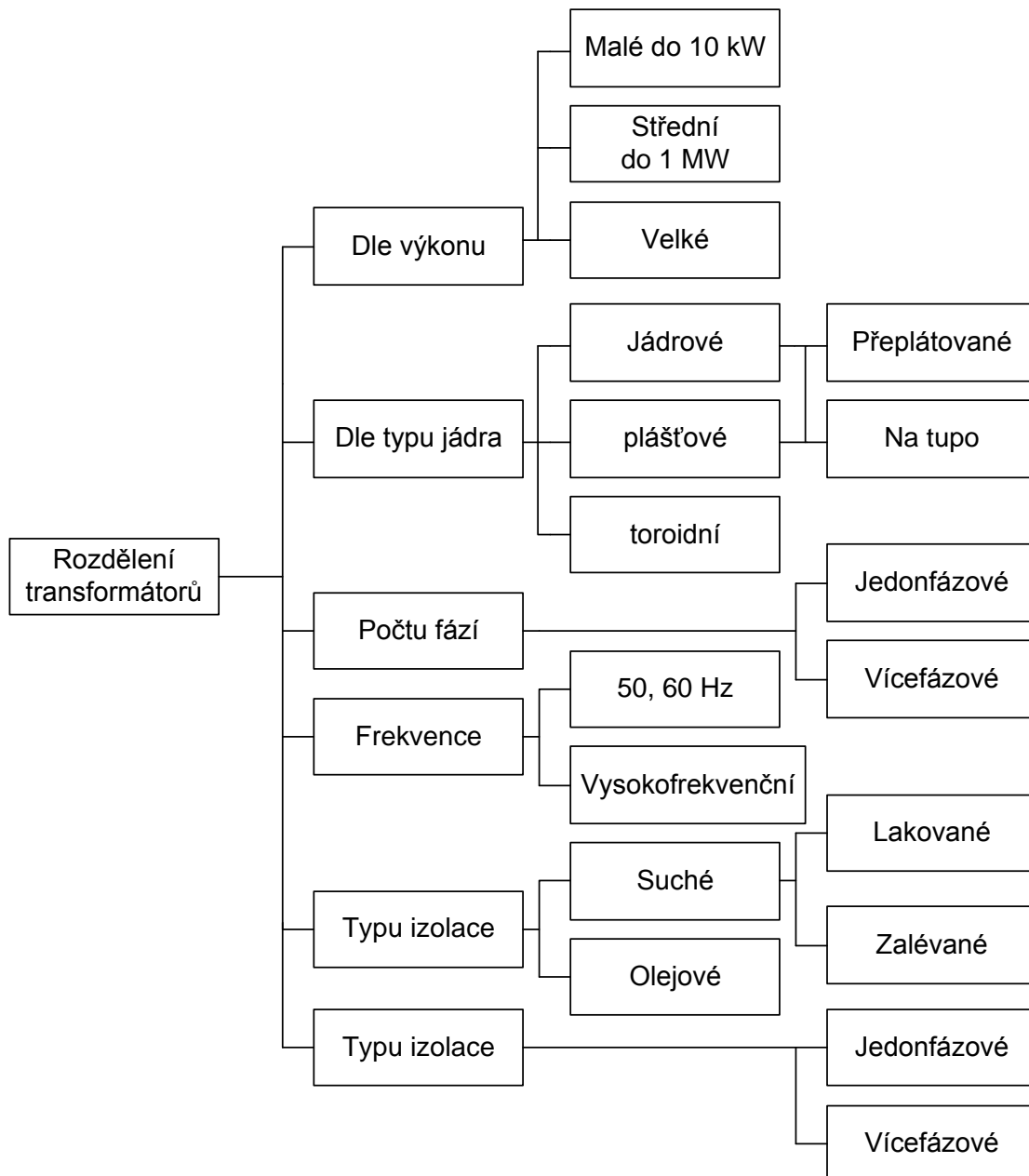
požadované hodnoty. Aby se dobře počítalo s hodnotami jak primární, tak sekundární strany, provádí se přepočítání sekundárních hodnot na primární, nebo naopak (dle potřeby). Přepočítání se provede tak, aby náhradní schéma skutečného transformátoru mělo vždy převod roven jedné.

$$R_{1k} = Z_{1k} \cos \varphi_k \quad (1.6.2)$$

$$X_{1k} = Z_{1k} \sin \varphi_k \quad (1.6.3)$$

## 1.7 Dělení transformátorů

Transformátory lze rozdělit podle obšírného množství kritérií, jejich rozbor by přesáhl rámec této práce, proto budou představeny pouze některé typy rozdělovacích kritérií (Obr. 1.7.).



Obr. 1.7. Rozdělení transformátorů

### 1.7.1 Lakované transformátory

Lakované transformátory nají oproti zalévaným a olejovým transformátorům několik výhod. Jako izolace je použita pryskyřice, kterou lze těžko zapálit a má samozhášivé vlastnosti, proto se často využívají v nebezpečných a zvláště nebezpečných prostorách jako jsou výškové budovy a podzemí. Tepelné ztráty způsobené proudem vodičů a vířivými proudy magnetického obvodu, kde jsou použity plechy pro elektrotechniku, nebo feromagnetické jádro, jsou u malých transformátorů chlazeny přirozenou popř. nucenou cirkulací vzduchu.

### 1.7.2 Olejové transformátory

Transformátor je ponořen do nádoby s olejem, kde má olej dvě základní funkce. Vysoká elektrická pevnost a tekutost zajišťuje velmi dobrou izolaci. Další hlavní vlastností je jeho chladicí účinek. Ohřátý transformátorový olej stoupá přirozenou konvekcí do vyšších míst olejové nádoby, která je chlazena buď přirozeným, nebo nuceným ofukováním pomocí vnějšího vzduchu. Chladnější olej má vyšší hustotu oproti teplému a je tlačěn do nižších míst, kde se ohřeje ztrátami transformátoru. Pro vyšší výkony lze účinnost chlazení transformátoru zvýšit pomocí nucené cirkulace oleje. Nevýhodou oleje je jeho postupná degradace způsobená oxidací a navlháním. Vysoká hořlavost zamezuje použití například v prostorách s nebezpečím výbuchu, dále se pod transformátor musí instalovat olejová jímka, která musí být schopna pojmout všechny olej z transformátoru při poruše. Toto opatření je nutné kvůli minimalizaci zamoření půdy.

### 1.7.3 Zalévané transformátory

Transformátory se zalitým vinutím, pro výkonové účely v řádech 1 MVA, se vyrábějí přibližně od 70. let 20. století. Po celém světě jich můžeme najít několik stovek tisíc, některé jsou v provozu déle než 30let. Proto se nedá říci, že by transformátory se zalitým vinutím nějak zaostávali ve své životnosti a spolehlivosti za distribučními olejovými transformátory. V poslední době patří mezi velmi používaný typ transformátorů. Tento typ transformátoru se používá, jelikož je odolný vůči dynamickým rázům, vlhkosti, chemikáliím a mechanickým rázům. Zalévané transformátory tak oproti minerálním olejům nepřispívají k rozšiřování požáru, protože neobsahují žádnou olejovou náplň. Proto mohou být použity i tam, kde jsou větší požadavky na požární bezpečnost. Jsou také šetrnější k ochraně přírody, mohou být například použity v místech, kde je požadována zvýšená ochrana prostředí. Tyto vlastnosti a výhody jsou ovšem vykoupeny vyšší pořizovací cenou a méně účinným způsobu chlazení.

Pod pojmem zalévací hmota si můžeme představit látku, která je ve většině případů nejprve ve zpracovatelském stavu jako kapalina a následně po aplikaci změni své skupenství za určitou dobu vytvrzení na pevné. Takovouto hmotu používáme pro ochranu částí elektroniky před nepříznivými vlivy prostředí, jako je například vlhkost, agresivní plyny a kapaliny, vodivý prach apod. Zalévací hmota zlepšuje mechanickou odolnost zalité elektroniky a ideálně také odvod tepla.



Vinutí všech typů transformátorů je zalité kompozitním plastem. Důvodů proč použít jako zalévací hmotu zrovna kompozitní plast je hned několik. Je to vynikající izolační prvek, má velmi dobrou adhezi. Nevýhodou je velice náročná technologie aplikace, protože kompozit při změně skupenství vytváří teplo kolem 130 °C a snižuje svůj objem. Při aplikaci je nutné neustále doplňovat kompozit a zároveň účinně chladit zařízení. V opačném případě hrozí poškození výrobku. V případě správného postupu nebude vinutí obsahovat dutinky a bude téměř neporézní s výbornou mechanickou odolností.

## **2. TEPELNÉ VLASTNOSTI PLASTŮ**

Významnou složkou transformátorů jsou plasty a další izolační materiály, a proto tato část bude zaměřena jejich tepelné vlastnosti.

Tepelné vlastnosti plastů a ostatních izolačních materiálů lze vyjádřit pomocí materiálových konstant, ke kterým patří měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti a teplotní součinitel dálkové či objemové roztažnosti. Vliv zvýšené nebo nízké teploty, které se vyskytují v praktické aplikaci plastových výrobků, může způsobit nejen strukturální změny základního polymeru, ale i změny mechanických vlastností jako je tvrdost, pevnost, tuhost a podobně. Dále se může měnit optická a elektrická vlastnost materiálu. Odolnost vůči tepelným vlivům nelze jednoznačně definovat a je posuzována dle různých smluvních zkoušek. Podrobněji se touto problematikou zabývá [5] a [6].

Bohužel nelze tyto zkoušky aplikovat za provozu, a proto si v praxi musíme vystačit s dělením izolačních materiálů do tepelných tříd dle trvalé tepelné odolnosti.

### **2.1 Trvalá tepelná odolnost [6]**

Každý plast má svou tepelnou oblast použití v závislosti na struktuře. Polymery během tepelného namáhání procházejí celou řadou nevratných změn, jakožto chemických, a i deformačních. Tento jev je dále ovlivněn dalšími působícími vlivy jako je vlhko, světlo, kyslík a podobně. Většinou se trvalá tepelná odolnost u plastu vyjadřuje takovou teplotou, která způsobí pokles mechanických vlastností maximálně o 10 % a to po dlouhodobém působení (minimálně 200 hodin).

V následujícím přehledu lze nalézt tepelné třídy a jejich hlavní charakteristické materiály.

#### **Tepelná třída Y (pro teploty do 90 °C)**

Vláknité materiály z celulózy, bavlny a přírodního hedvábí, neimpregnované a neponořené do tekutého elektroizolačního materiálu.

#### **Tepelná třída A (pro teploty do 105 °C)**

Vláknité materiály z celulózy, bavlny nebo přírodního a syntetického hedvábí, impregnované nebo ponořené do tekutého elektroizolačního materiálu (laky na bázi přírodních pryskyřic modifikovaný vysychavými oleji, ropné a syntetické kapaliny).

#### **Tepelná třída E (pro teploty do 120 °C)**

Syntetické organické materiály (fólie, vlákna, pryskyřice, směsi), materiály na bázi lesklé lepenky a polyethyltereftalátové fólie, tvrzené papíry a tkaniny, plasty s organickými plnidly, epoxidové, polyuretanové a další syntetické laky na izolaci lakovaných vodičů, termoreaktivní kompaundy, fólie z TAC a z polykarbonátu apod. Pro impregnaci a izolační povlaky lze použít laky na bázi syntetických a přírodních pryskyřic modifikovaných rostlinnými oleji.

### **Tepelná třída B (pro teploty do 130 °C)**

Materiály na bázi slídy, azbestu a skleněných vláken, používané s organickými pojidly (přírodní a syntetické pryskyřice) a impregnačními prostředky (přírodní, polyesterové, epoxidové pryskyřice, termoplastické bitumentové kompaundy apod.

Pro impregnaci a izolační povlaky jsou vhodné rovněž termoreaktivní fenolformaldehydové pryskyřice.

### **Tepelná třída F (pro teploty do 155 °C)**

Materiály na bázi slídy, azbestu a skleněných vláken ve spojení se syntetickými pojidly a impregnačními prostředky (pojidla a laky z modifikovaných a nemodifikovaných alkydových, epoxidových, silikonových, polyesterových a jiných pryskyřic), polyesterimidové laky pro izolaci vodičů.

### **Tepelná třída H (pro teploty do 180 °C)**

Materiály na bázi slídy, azbestu, skleněného vlákna, plasty s anorganickým plnivem, azbestocement a silikonové elastomery používané ve spojení se silikonovými pojidly a impregnačními prostředky (silikonové laky a pryskyřice odpovídající dané tepelné třídě), remikanit a slídové pásy s anorganickým podkladem nebo bez podkladu, papír na podkladě aromatických polyamidů.

### **Tepelná třída C (pro teploty nad 180 °C)**

Slída, porcelán, keramické materiály, sklo, křemen, elektrotechnická břidlice, neimpregnovaný azbestocement, mikalex, polytetrafluoretylén, nebo jejich kombinace používané bez pojidel nebo s anorganickými a organokovovými impregnačními prostředky, polyamidové pryskyřice pro izolaci lakových vodičů.

Nejvyšší dovolená teplota u materiálů tepelné třídy C je určována chemickými, fyzikálními, mechanickými a elektrickými vlastnostmi.

### 3. ZPŮSOBY MĚŘENÍ TEPLoty [7]

Předchozí kapitola se zabývala vlastnostmi plastů a ostatních izolantů v závislosti teplotě, a proto se této části prozkoumají způsoby měření teploty. Existuje nepřehledné množství způsobů měření teploty, které by přesáhlo rozsah této práce, a proto byly metody protříděny z konstrukčního a ekonomického hlediska. Nižší uvedené metody odpovídají požadovaným kritériím.

#### 3.1. Kovové odporové senzory

Podstata takovýchto senzorů spočívá v teplotní změně jejich odporu, protože kov je souhrn kladných iontů v krystalové mřížce a elektronového plynu s neuspořádaným pohybem elektronů.

Jako základní vztah Materiálové konstanty je zde teplotní koeficient odporu  $TKR_{Cu}$ . Pro rozsah teplot 0 až 150 °C můžeme použít vztah 3.1.1.

$$R_T = R_0 \cdot (1 + TKR_{Cu} \cdot \Delta T) \quad (3.1.1)$$

Tyto vztahy jsou lineární a nelze je použít pro větší rozsahy teplot, proto je přiložena Tab 3.1.1 s materiály pro kovové odporové senzory i jejichmi vlastnostmi.

Materiál	$TKR \cdot 10^2 (K^{-1})$	Teplotní rozsah (°C)
Platina	0,385 – 0,391	-20 až 850
Nikl	0,617 – 0,675	-70 až 150 (200)
Ni-Fe	0,518 – 0,527	-100 až 200
Měď	0,39	-50 až 150

Tab 3.1.1 Použité materiály pro odporová čidla [7]

##### 3.1.1 Platinové snímače teploty

Výroba platinových snímačů teploty je provedena tak, že naprašováním ve vakuu je nanášena tenká vrstva vysoce čisté platiny. Dále laser nastaví odpor čidla pro dané meze a pasivační vrstva aktivní plochy čidla chrání proti mechanickému a chemickému poškození. Vývody z čidla jsou přivařeny k meandru.

Platinové snímače jsou rozděleny na několik tříd, kde třída A je určena pro teploty -200 °C až 650 °C, třída B pro -200 °C až 850 °C. Poté jsou vysokoteplotní snímače pro teplotu až 1100 °C a čidla určená pro meteorologii s čistotou platiny 99,999 %

##### 3.1.2 Niklové snímače teploty

Výrobní postup niklového snímače teploty je totožný s výrobou platinového snímače teploty, a proto zde nebude popsán.

Hlavní výhodou niklových snímačů je vysoká citlivost, minimální časová odezva a především jeho malé rozměry. K nevýhodám řadíme omezený teplotní rozsah, horší dlouhodobá stabilita

a také poměrně velká nelinearita při porovnání s platinovými snímači. Snímače se vyrábějí s těmito hodnotami odporů 100, 200, 500, 891, 1000, 2000 a 2226  $\Omega$ .

### **3.1.3 Měděné snímače teploty**

Lze je použít pro teplotní rozsah -200 až 200 °C, kde lze závislost vyjádřit pomocí (3.1.2) pro rozsah teplot -50°C až 150 °C při  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,

Tento druh čidel má malou rezistivitu a velice snadno zoxidují, proto se běžně nevyrábí.

### **3.1.4. Konstrukce kovových odporových senzorů**

Čidlo (měřící odpor dle ČSN 25 8005) je Základním segmentem senzoru teploty a lze vyrobit buď drátkovou metodou anebo tenkovrstvou a tlustovrstvou metodou.

Drátkový je zkomponován ze stočeného platinového drátku a následně uložen do válcových kapilár keramických tělísek a zajištěn. Také lze navinout na vnější povrch keramického nebo skleněného tělíska a následně zataven do skla. Tato konstrukce má vysokou odolnost proti otřesům a vibracím.

Vrstvová technologie využívá čidlo složené z odporové vrstvy nanesené na substrátu z korundové keramiky. Tenkovrstvou technologií se nanese vrstva naprašováním nebo napařováním. Oproti tlustovrstvé technologii, kde se kov nanese na substrát sítotiskem.

## **3.2. Polovodičové odporové senzory**

Jejich funkce je založena na teplotní závislosti odporu při záporným teplotním součinitelem odporu  $\alpha$ . Lze je rozlišit na termistory a monokrystalické odporové senzory, které se dále dělí na negistory a pozistory.

### **3.2.1 Termistory**

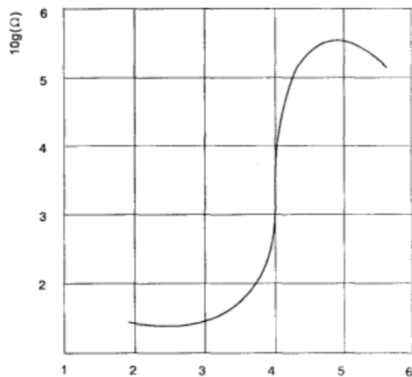
Termistor (thermally sensitive rezistor) není nic jiného než odpor závislý na teplotě. Skládá se z polovodičových fotoelektrických keramických materiálů. Výhodou je vysoká teplotní citlivost, miniaturní velikost a prostý převod odporu na elektrické veličiny. Jako nevýhodu lze zařadit nelineární charakteristiku.

### **3.2.2 Negistory (NTC termistory)**

Negistor je termistor s velkým záporným teplotním součinitelem odporu. Výroba probíhá za pomoci práškové metody z oxidu chromu, kobaltu, železa, mědi, manganu, titanu a niklu. Lze je vyrobit jak pro teploty od -50 °C do 150 °C, tak pro vysoké teploty až do 1000 °C

### 3.2.3 Pozistory (PTC termistory)

Pozistory se vyrábějí z polykrystalické keramiky (titaničitan barnatý) a proto mají kladný součinitel odporu. Dále lze z obr x vypořadovat, že hodnota odporu nejdřív mírně poklesne až do bodu Curieovy teploty, následně dojde k prudkému navýšení odporu materiálu. Po nárůstu odporu o několik řádů dojde k opětovnému klesnutí. Viz Obr 3.2.3



**Curieova teplota** – Francouzský fyzik Pierre Curie zjistil, že nad tímto bodem ztrácí magneticky aktivní materiál své feromagnetické vlastnosti. Pro jednotlivé materiály je tento bod určen následovně, železo 768 °C, kobalt 1130 °C a nikl 358 °C.

**Obr. 3.2.3 Teplotní závislost odporu na teplotě pro PTC termistor**

### 3.3. Monokrystalické senzory

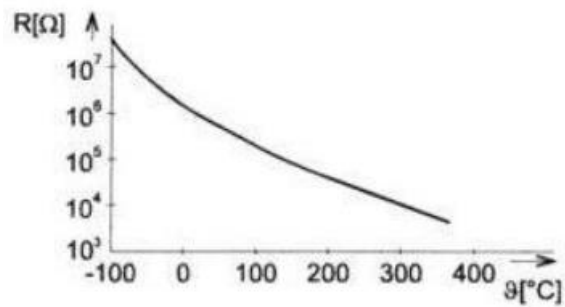
Lze je vyrobit z křemíku, germania, india a jejich směsí, v praxi se setkáme pouze se senzory na křemíkové bázi.

#### 3.3.1 Křemíkové senzory (Si)

V praxi jsou vyráběny pro měření teploty od -50 °C až do 150 °C. Konstrukce je zhotovena z polovodiče typu N, který má dominantní elektronovou vodivost. Také teplotní závislost rezistivity je závislá na dotační koncentraci příměsí a tím je určena teplotní pohyblivost nosičů náboje. Při zvýšení teploty dojde ke snížení pohyblivosti nosičů díky jejich rozptylu na mřížce a tím dojde k nárůstu odporu polovodiče. Tyto senzory mají kladný teplotní součinitel odporu.

#### 3.3.2 SiC senzory

Je využíván pro rozsah od -100 °C do 450 °C. Výroba je prováděna tenkovrstvou technologií vysokofrekvenčním napařením na substrát oxidu hlinitého. Odpor u těchto senzorů klesá s rostoucí teplotou. Viz Obr 3.3.2

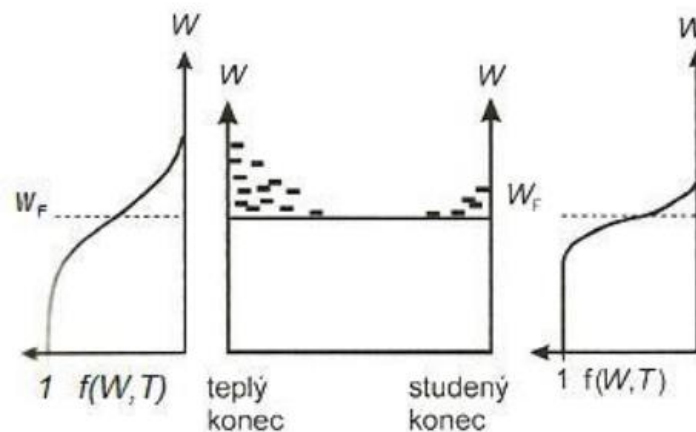


Obr. 3.3.2. Charakteristika SiC čidla

### 3.4. Termoelektrické články

#### Seebeckův jev

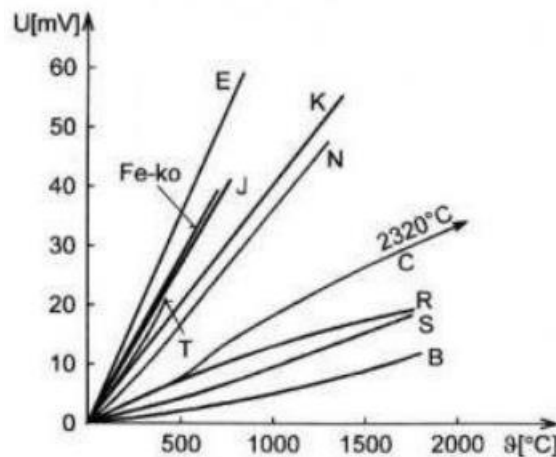
Přeměňuje teplotní rozdíl na elektrické napětí. Německý fyzik Thomas Johann Seebeck tento jev objevil v roce 1821, při čemž zjistil, že nosiče náboje mají větší energii v teplejší části vodiče a proto difundují ve větším množství do chladnějších míst vodiče. Tak vznikne převaha buď kladných, nebo záporných nábojů. Rozložení je znázorněno na Obr. 3.4.



Obr. 3.4. Seebeckův jev pro jeden materiál [7]

#### 3.4.1. Rozdělení termočlánků

Jednotlivé páry termočlánků mají přijatelnou nelinearitu závislosti termoelektrického napětí na teplotě díky materiálům používaných na jejich výrobu. Také mají velkou odolnost proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření a v neposlední řadě dlouhodobou stabilitu charakteristiky  $U = f(\Delta t)$ . Termočlánky se označují velkými písmeny. Na Obr. 3.4.1 jsou znázorněny jejich charakteristiky.



**Obr. 3.4.1. Charakteristiky termoelektrických článků**

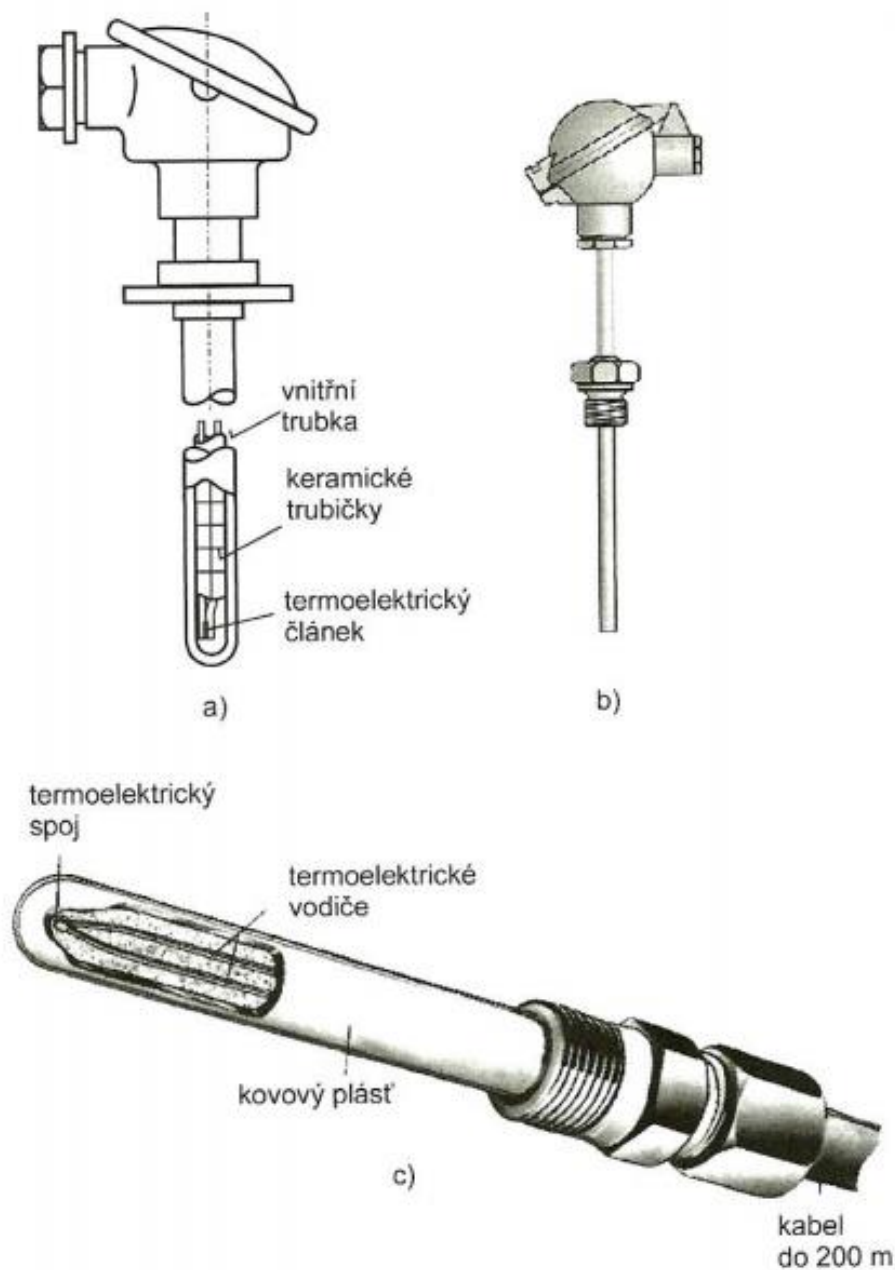
Termočlánek typu K (NiCr-Ni) se používá pro oxidační a interní atmosféru. Výhodou je necitlivost na neutronový tok a nevhodnost do vakua. Termočlánek typu T (Cu-CuNi) lze využít do nízkých teplot, do redukční, oxidační, interní atmosféry a také do vakua. Termočlánek typu N (NiCrSi-NiSiMg) se stabilní charakteristikou do teploty 1300 °C, je určený pro cyklické změny teploty. Například v jaderné energetice. Termočlánek Typu E (NiCr-CuNi) s nejvyšší hodnotou termoelektrického koeficientu, je vhodný pro měření v oxidační atmosféře a ve vakuu. Termočlánek Typu R (PtRh 13-Pt), s odolností proti oxidaci a korozi, je využíván pro měření vysokých teplot až do 1780 °C. Obdobné využití jako článek typu R má i termočlánek typu S (PtRh 10-Pt). Typ B (PtRh30-PtRh6) je použitelný pouze do teploty 100 °C a vlastnostmi podobnými s R a S. Pro extrémně vysoké teploty lze využít termočlánek typu G (W-WRh), který je chemicky stabilní, vhodný do oxidačních a inertních atmosfér, vakua a také do vodíku. Obdobné využití a vlastnosti má i článek typu C (WRh5-WRh26). [7]

### 3.4.2. Konstrukce termočlánků

#### Drátové termočlánky

Tento druh termočlánků je tvořen jedním párem kovových větví, uložených v izolačních trubičkách. Vodiče mají průměr od 0,5 mm do 3,5 mm. Jako izolace se využívá opleť skleněnými vlákny, plasty, smalty, keramické trubičky a podobně. Konstrukční uspořádání je viditelné na Obr. 3.4.2.

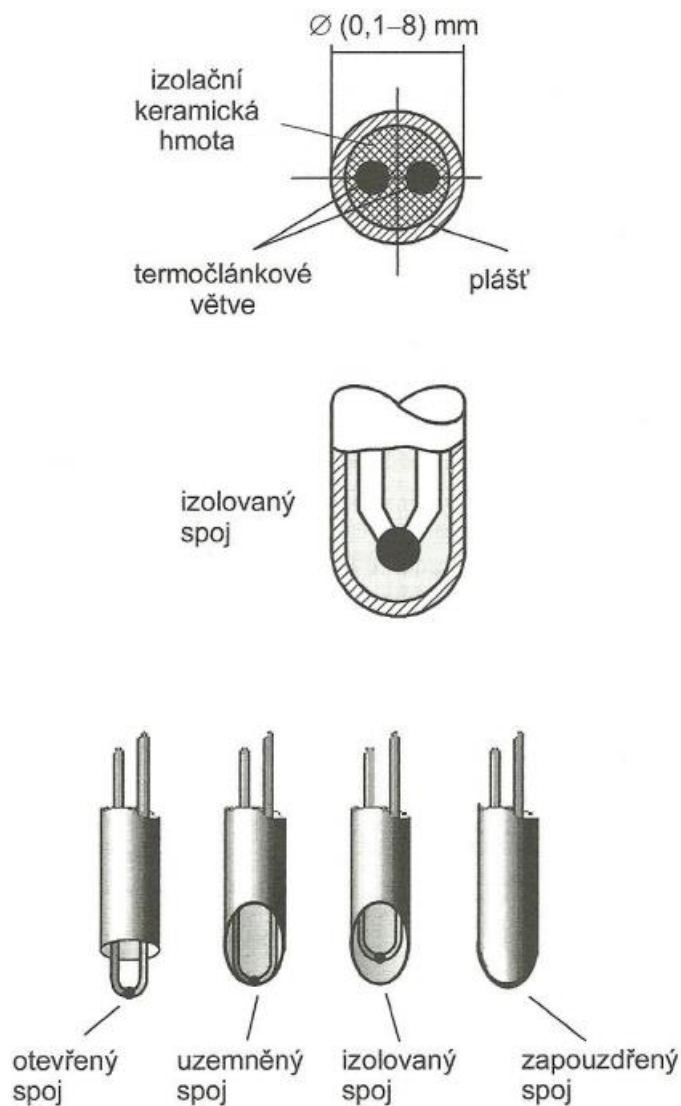




**Obr. 3.4.2 Termoelektrický snímač teploty a) tyčový, b) do jímky, c) plášťový kabel**

#### **Plášťové termočlánky**

Termoelektrické vodiče jsou vloženy do pláště trubicovitého tvaru a izolovány práškovou minerální izolací z  $MgO$  nebo  $Al_2O_3$ . Plášť o průměru od 0,1 mm až do 8 mm, je vyroben z korozivzdorných ocelí, chromniklových slitin, nebo ze slitin PtRh10. Konstrukční uspořádání je vyobrazeno na Obr. 3.4.3.



**Obr. 3.4.3 Plášťové termoelektrické články**

Izolovaný spoj má nejdelší dobu odezvy, protože chrání termoelektrický spoj proti okolním vlivům. Otevřený spoj má nejrychlejší odezvu na úkor minimální ochrany spoje a proto jej nelze použít pro agresivní a vlhké prostředí.

### **Speciální termočlánky**

Mezi tyto články lze zařadit snímače do prostředí s nebezpečím výbuchu, snímače s dvou vodičovým převodníkem teploty nebo kompenzací na vztažnou teplotu. Také snímače využívané pro měření teploty taveniny pro kontinuální, nebo jednorázové měření.

## **3.5. Měření teploty Dotykovými teploměry**

### **3.5.1. Měření teploty pevných objektů**

Pro toto měření je nezbytně nutné do objektu vyhloubit otvor, nebo měřený objekt komponovat se senzorem již v konstrukční fázi. Dále je nezbytně nutné, aby byl zajištěn velký přestup tepla z objektu do snímače a zároveň minimalizovat přestup tepla do okolí.

### 3.5.2. Měření povrchové teploty pevných objektů

Dotykem teploměru a objektu dochází k narušení neplotního pole v tělese a tím i k narušení sdílení tepla, dále senzor nedosedá celou svou plochou na měřený objekt a vzniká další nepřesnost měření.

### 3.6. Bezdotykové měření teploty

Bezdotykové měření je prováděno pomocí vysílaného elektromagnetického záření, které je přijímáno detektorem záření vlnové délky  $\lambda$  od 0,4  $\mu\text{m}$  až do 25  $\mu\text{m}$ . Tuto oblast lze rozložit na 5 podoblastí:

- viditelného spektra 0,4  $\mu\text{m}$  až do 0,78  $\mu\text{m}$ ,
- blízkého IR spektra 0,78  $\mu\text{m}$  až do 1  $\mu\text{m}$ ,
- krátkovlnného IR spektra 2  $\mu\text{m}$  až do 3  $\mu\text{m}$ ,
- středovlnného IR spektra 3  $\mu\text{m}$  až do 5  $\mu\text{m}$ ,
- dlouhovlnného IR spektra 5  $\mu\text{m}$  až do 25  $\mu\text{m}$ .

Výhodou tohoto měření je nepatrný vliv měřicího aparátu na měřený objekt, lze měřit teplotu pohyblivých a rotujících částí, možnost měřit z bezpečné vzdálenosti a také umožňuje zaznamenat rychlé změny teploty. Nevýhodou této metody je nepřesnost způsobená neznámou emisivitou povrchu tělesa a neznámá hodnota propustnosti prostředí mezi měřicím aparátem a měřeným objektem. [7]

#### 3.6.1. Černé těleso

Ideální těleso, které dokonale pohlcuje dopadající záření bez ohledu na úhlu dopadu a vlnové délce. Zář černého tělesa je v každém úhlu konstantní a emisivita  $\varepsilon$  takového tělesa je vždy 1. Pro kalibraci lze využít černý zářič s emisivitou  $\varepsilon$  0,99 až 1. Nejčastěji je konstruován dutinovým zářičem s reflexním, difuzním, nebo difuzně reflexním povrchem.

#### 3.6.2. Termovize

Každé těleso o teplotě vyšší než absolutní nula ( $0\text{ K} = -273\text{ }^\circ\text{C}$ ) ze svého povrchu sálá infračervené záření IR, které termokamera snímá a následně převádí do barevného spektra blízkému člověku. Takže aby kamera určila správnou teplotu povrchu sálající teplo, musí znát jeho emisivitu, které odpovídá vyzářená infračervená oblast z povrchu snímaného tělesa. Jinak teplotu povrchu přepočítá špatně. Protože snímání objektu nemá stejnou emisivitu, na kterou je tepelná kamera od firmy FLIR přednastavena, musí se na měřený objekt připevnit černé štítky od výrobce kamery odpovídající přednastavené emisivitě 0,95. Tyto štítky zajistí, že kamera správně určí teplotu v označených bodech. [18]

### **3.7 Výběr měřících metod**

Pro následující experiment byly vybrány tři způsoby měření. Měření odporu mědi za využití primárního vinutí transformátoru jako senzoru. Dále bude využit termočlánek typu K a k bezkontaktnímu měření bude využita termovize.

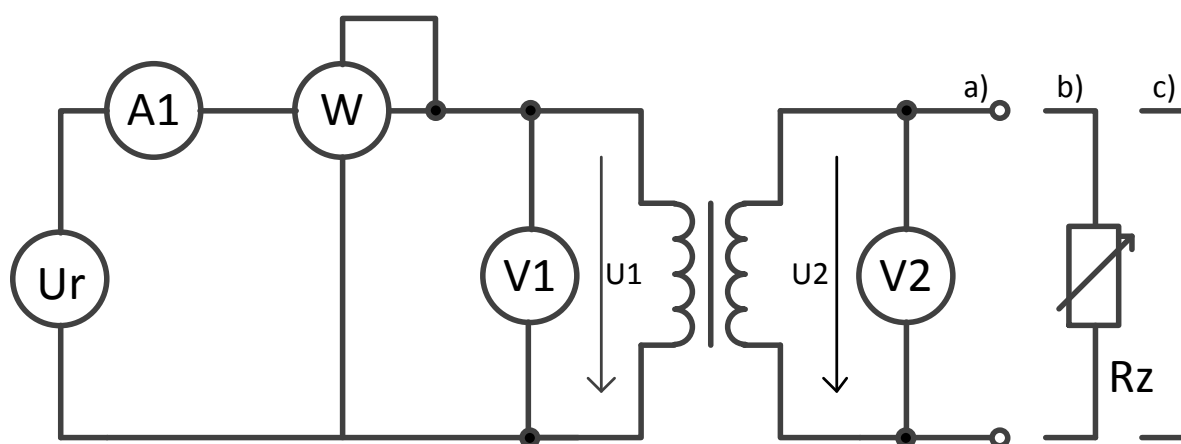
## 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4.1 Teoretický úvod

Úkolem experimentální části je porovnat vybrané způsoby měření teploty transformátoru a určit štítkové údaje neznámého transformátoru za pomoci maximální tepelné třídy izolace. Měřené objekty jsou dva transformátory. Transformátor  $TR_1$ , pro přehlednost jej označíme jako „nový“, se známými štítkovými údaji, poslouží pro ověření platnosti experimentální metody určení štítkových údajů s uvažováním tepelného systému, který je respektován tepelnou třídou izolace. Transformátor  $TR_2$ , označen jako „starý“, bez štítkových údajů.

### 4.2 Popis měření

Měřicí pracoviště a jeho komponenty byly zapojeny dle schématu na Obr 4.2, kde se měření skládalo ze tří částí. Část a) měření naprázdno, část b) měření při činné zátěži a část c) měření nakrátko.



Obr. 4.2 Schéma zapojení měřícího pracoviště

#### 4.2.1 Použité přístroje Obr. 4.2.1.

$A_1$  .... Multimetr METEX M 3890D  
s/n: 942822 CVUT: z2-03015127/000

$V_1$  .... Multimetr METEX M 3860D  
s/n: 64677 CVUT: D3-03064677/000

$W_1$ .... Laboratorní wattmetr 6L-11

s/n: 9706703 CVUT: D3-03063875/000

V<sub>2</sub> .... Multimetr GOLDSTAR DM-311

s/n: S70900998 CVUT: D3-03059682/000

R .... Přesný číslicový MULTIMETR M1T 290

Metra Blansko 220 V – 70 VA – 50 Hz

s/n: 6143124

T<sub>0</sub> .... Digitální termometr GTH 175/MO

rozsah od -199,9 do 199,9 °C.

T<sub>k</sub> .... Digitální termometr GTH 1170

termočlánek typ K, rozsah od -65 do 1150 °C

T<sub>t</sub> .... Termokamera FLIR i7

rozsahem -20°C do 250°C a přesnost čtení ±2 °C

TR<sub>1</sub>.... Transformátor TAM 5542 – 5AJ10 – 0FA0

0,8 kVA / 3,4 kVA 50-60 Hz ta = 40 C / B

s/n: EN 61558

PRI 380 V 400 V 420 V

SEK 31-32 110 V / 7,27 A

TR<sub>2</sub>.... Laboratorní transformátor bez štítkových údajů

Jako zdroj napětí sloužil laboratorní rozvaděč v místnosti 264 katedry elektrotechnologie elektronickou regulací rozsahu napětí od 0 V do 400 V.

Činný odpor zátěže byl zkomponován z kombinace dvou pevných drátových odporníků o hodnotách 175 Ω a 2.5 A, dvojitého paralelního regulačního drátového odporníku o hodnotách 155 Ω a 2.5 A, Obr. 4.2.2. Konfigurace byla volena s ohledem na výkonové požadavky a celkový odpor bylo možné regulovat od 7.6 Ω do 16.2 Ω.



Obr. 4.2.1 Měřicí přístroje, zleva  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $U_2$ ,  $P$



Obr. 4.2.2. Činné odpory zátěže  $R_z$ , vlevo regulační drátový odporník a vpravo pevný drátový odporník

#### 4.2.2 Měření naprázdno

Dle schématu a) na Obr. 4.2 bylo postupně nastavováno napětí  $U_1$  a měřen proud  $I_1$  a výkon  $P$  na svorkách primárního vinutí a napětí  $U_2$  na svorkách sekundárního vinutí. Z Naměřených dat lze sestrojít magnetizační křivku, protože proud  $I_1$  je analogický k magnetickému toku  $H$  a napětí je analogické k magnetické indukci  $B$ .

$$N_1 \cdot I_{10} \oint H \cdot dl \Rightarrow I_{10} \rightarrow H \quad (4.2.2.1)$$

$$U_{20} = 4,44 \cdot B_{max} \cdot S \cdot f \cdot N_2 \Rightarrow U_{20} \rightarrow B_{max} \quad (4.2.2.2)$$

Z toho vyplývá, že charakteristika naprázdno je závislostí  $U_{20} = f(I_{10})$ , která je analogická k magnetizační křivce  $B = f(H)$ . Z této charakteristiky se stanoví dle polohy pracovního bodu veličiny  $U_{10}$  a  $U_{20}$ , které budou potřeba v dalších měřeních. Měření bylo provedeno několikrát, aby byla zaručena spolehlivost výsledku.

Také lze ze získaných dat určit ztráty naprázdno  $P_0$ , které nabyly hodnot 36 W pro transformátor  $TR_1$  a 32 W pro  $TR_2$ . Ztráty v mědi  $P_{cu}$  byly vypočítány na 0,5 W pro  $TR_1$  a 1,5 W což jsou zanedbatelné hodnoty a lze uplatnit rovnici 4.2.2.3.

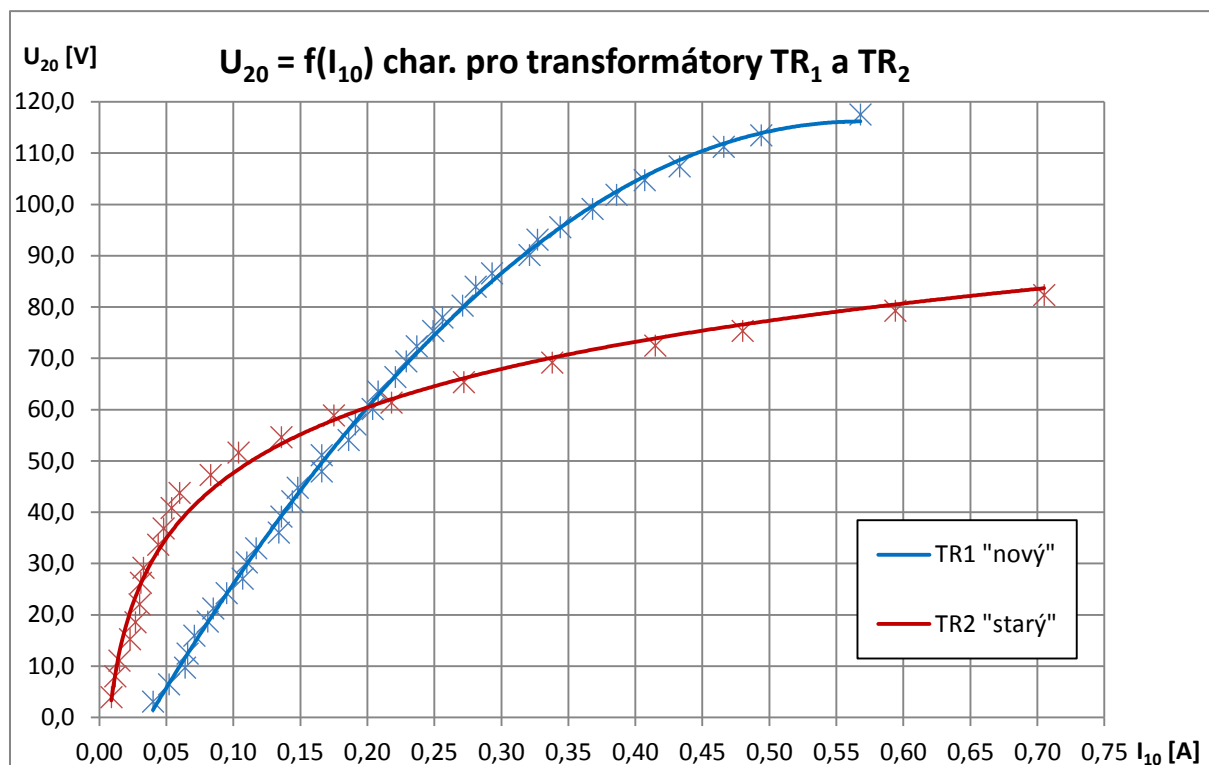
$$P_0 = P_{fe} + P_{cu} \Rightarrow P_0 \cong P_{fe} \quad (4.2.2.3)$$

Měření proběhlo při teplotě okolí  $T_0 = 24 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$  a odporu primárního vinutí  $R_{cu}$  pro transformátor  $TR_1$   $2 \text{ } \Omega$  a pro  $TR_2$   $3,09 \text{ } \Omega$

Z tabulky naměřených hodnot (příloha Tab. 7.1. až 7.8.), byly sestrojeny následující grafy.



Charakteristika naprázdno pro oba transformátory.



Z výše uvedeného grafu vyplývá, že transformátor TR<sub>1</sub> má větší magnetický rozptyl, který je dán skladbou jádra na tupo a jeho svařením. Transformátor TR<sub>2</sub> má proti TR<sub>1</sub> jádro složené přeplátováním, což má za následek malý magnetický rozptyl.

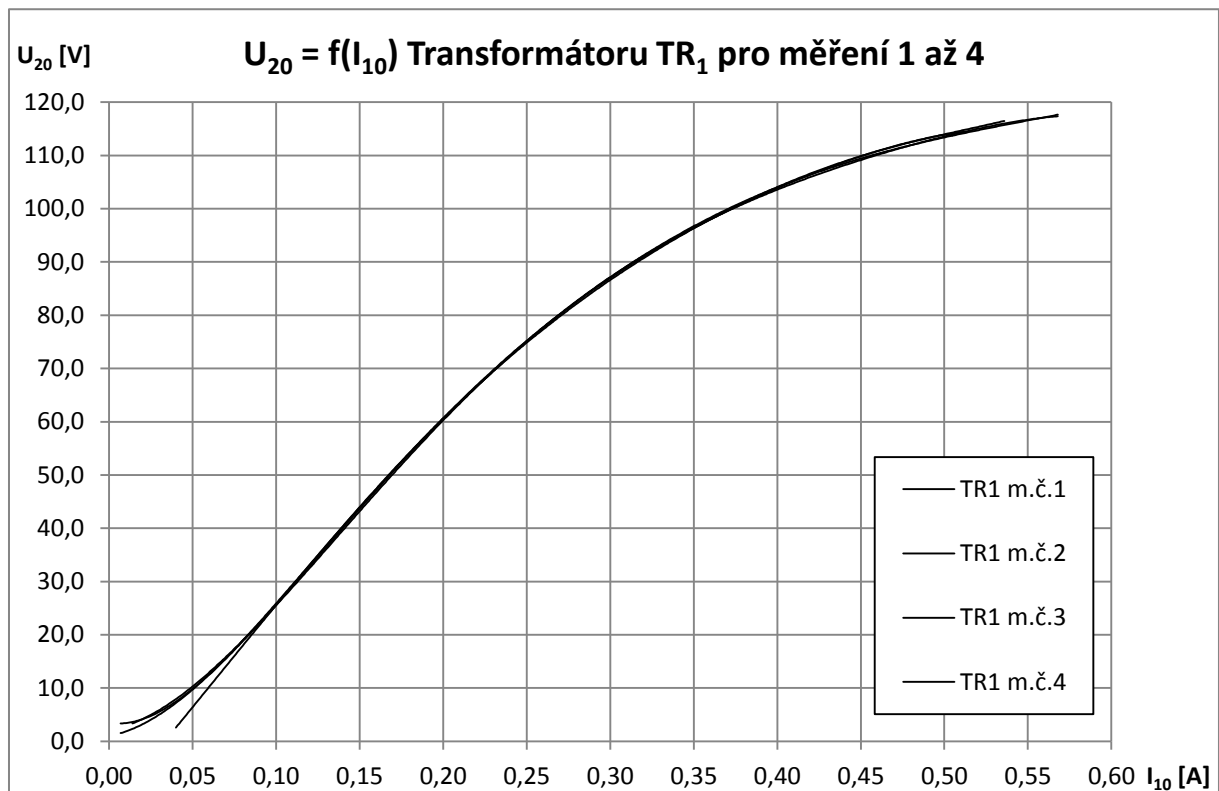
Dále bylo z měření ověřeno jmenovité napětí  $U_{10}$  a  $U_{20}$ , dle polohy pracovních bodů křivek. Pro nový transformátor vyšly hodnoty  $U_{10}=380$  V a  $U_{20}= 113$  V a pro starý vyšly hodnoty  $U_{10}=230$  V a  $U_{20}= 82$  V. Hodnoty na sekundárním vinutí jsou nepatrně vyšší, což je dáno tím, že transformátor je nezátížen a při zátěži napětí klesne na předpokládanou hodnotu.

Pomocí vzorce (4.2.2.4) byl vypočítán převod transformátorů.

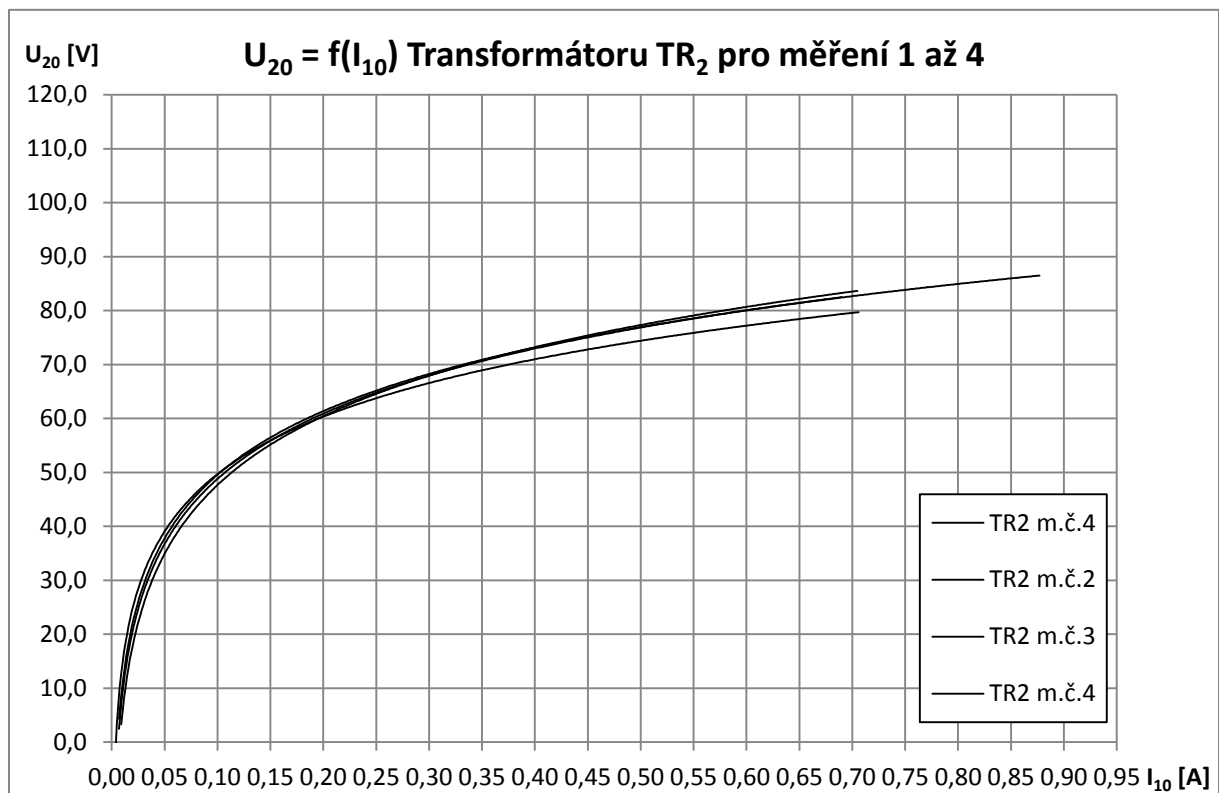
$$p_1 = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{380}{113} = 3,37 \quad (4.2.2.4)$$

$$p_2 = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{230}{82} = 2,8$$

Graf porovnání naměřených hodnot pro transformátor TR<sub>1</sub> „nový“.



Graf porovnání naměřených hodnot pro transformátor TR<sub>2</sub> „starý“.



Při bližším prozkoumání grafů pro měření 1 až 4 lze vyvodit, že měření bylo úspěšně

reprodukovatelné s malým rozptylem mezi jednotlivými měřeními. Z důvodu grafického zpracování byla hodnota v nule vyřazena.

### 4.2.3 Měření při činné zátěži

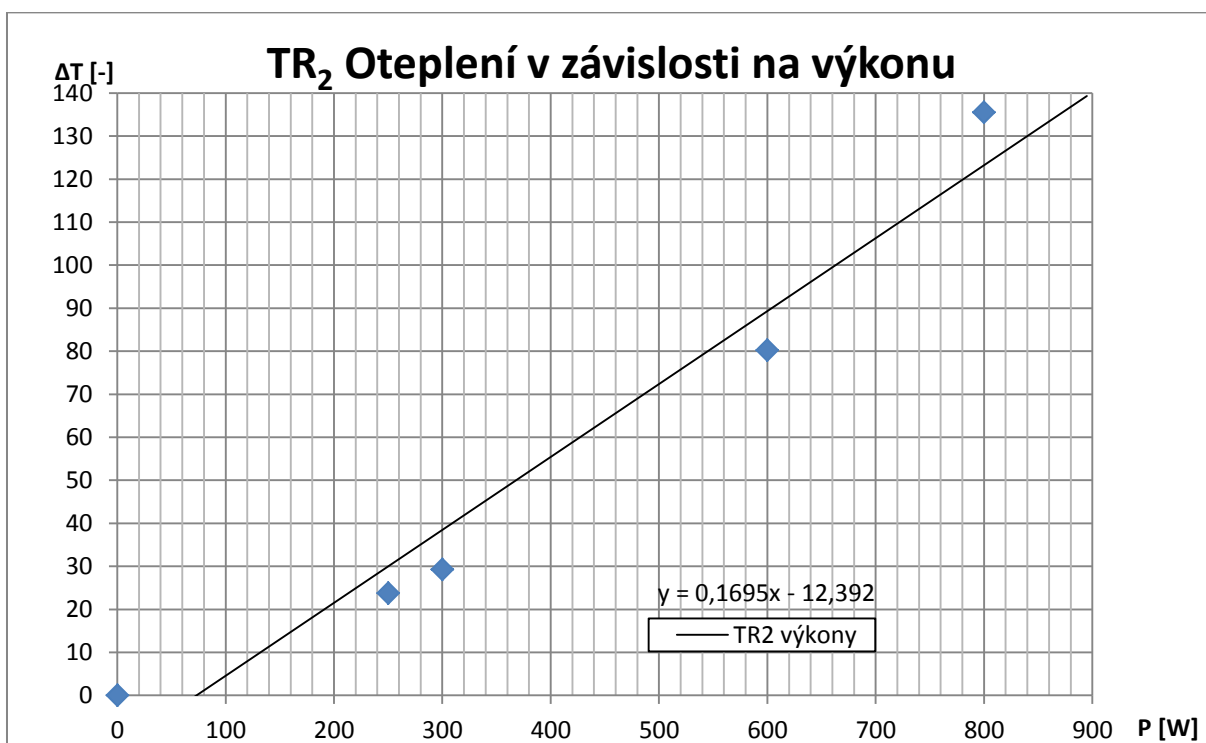
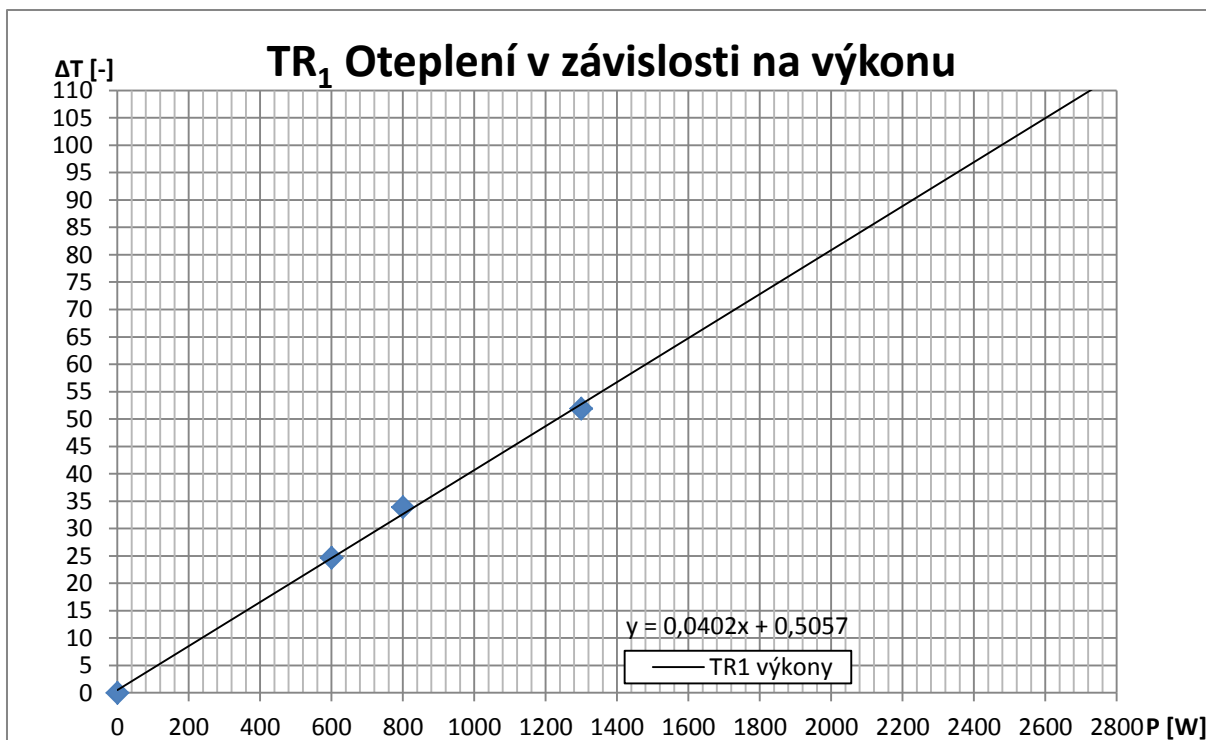
Pracoviště bylo zapojeno dle schématu b) na Obr. 4.2. Pro oba transformátory umožní přesnější stanovení výkonu  $P$  při konstantním jmenovitém napětí  $U_{10}$  na primárním vinutí pro transformátor  $TR_1$  to je 380 V a pro  $TR_2$  230 V. Činná zátěž  $R_z$  se reguluje pomocí drátového odporníku a aby odpovídala požadované hodnotě, řádově deseti až dvaceti násobek ztrát naprázdno  $P_0$ .

Pro měření odporu je nezbytně nutné nejdříve odpojit zdroj, poté změřit odpor vinutí primární cívky pomocí ohmmetru a následně zdroj opět připojit. Tento proces musí trvat co nejkratší dobu, aby se do měření nezašla velká nepřesnost z důvodu přerušovaného chodu transformátoru. Měří se odpor na primární straně z důvodu větší nominální hodnoty mědi.

Měření probíhalo vždy v sudých minutových intervalech. Pro vybraný výkon 800 W bylo zakomponováno měření pomocí termočlásku typu K a snímání pomocí termokamery vždy proběhlo v lichých časových intervalech.

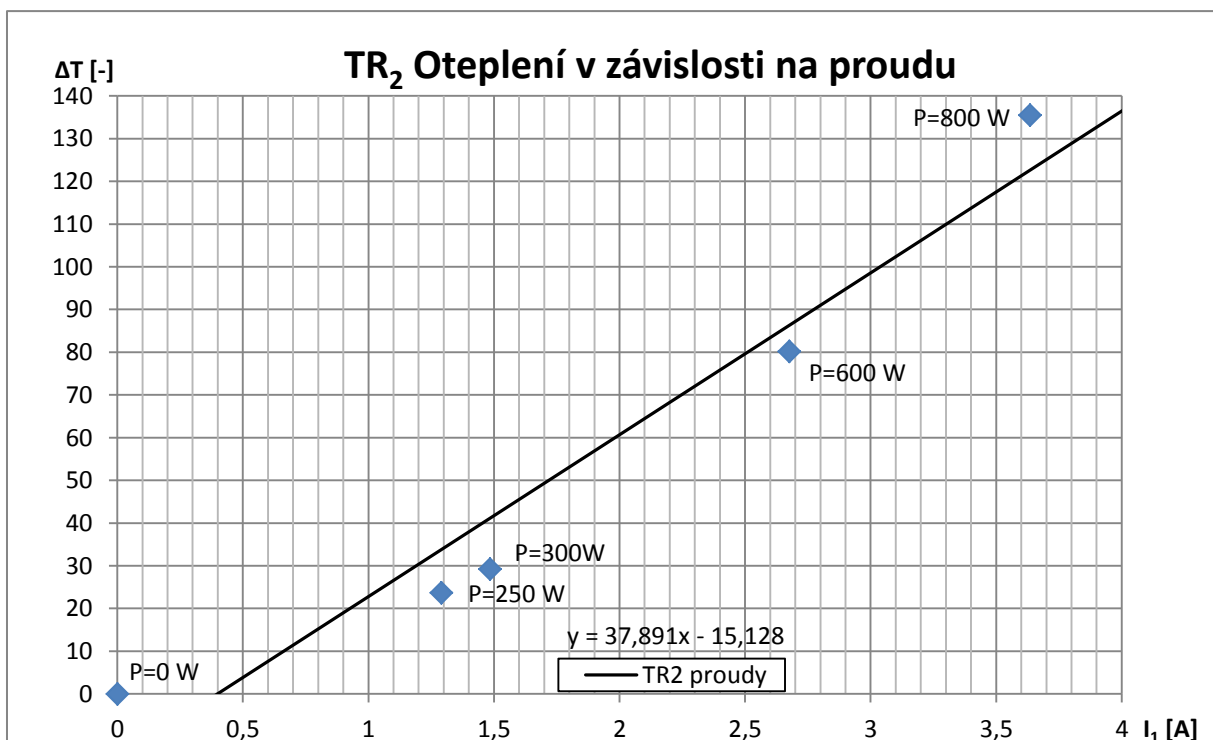
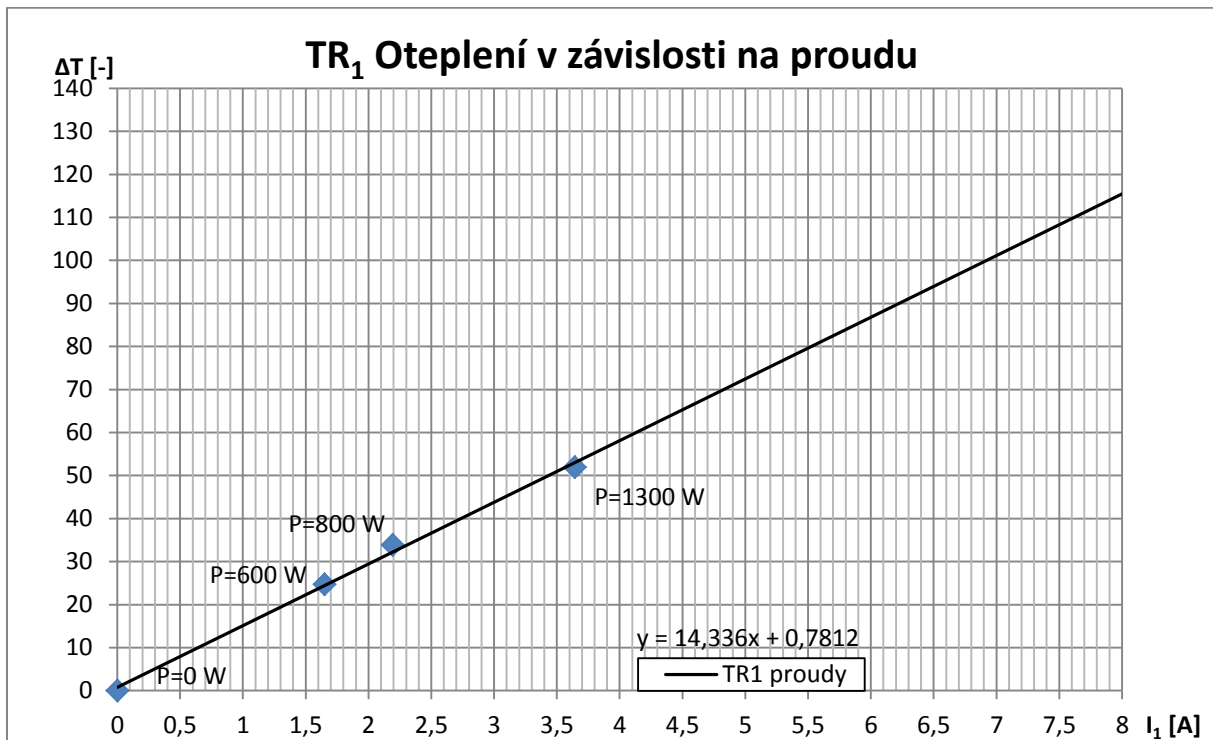
Z naměřených hodnot lze zkonstruovat křivku oteplení v závislosti na proudu nebo výkonu, ze které lze aproximovat bod maximálního výkonu v závislosti na tepelné třídě izolačního systému. Dále lze z hodnot zhotovit charakteristiku oteplení transformátoru pro různé způsoby měření teploty.

Tabulek naměřených hodnot, které lze nalézt v příloze (Tab. 7.9. až 7.15.) , byly sestrojeny grafy pro oteplení v závislosti na výkonu a proudu za pomocí vzorce (3.1.1) a z tabulek v příloze (Tab. 7.16. a 7.17.) byly sestrojeny grafy oteplení pro různé způsoby měření teploty.



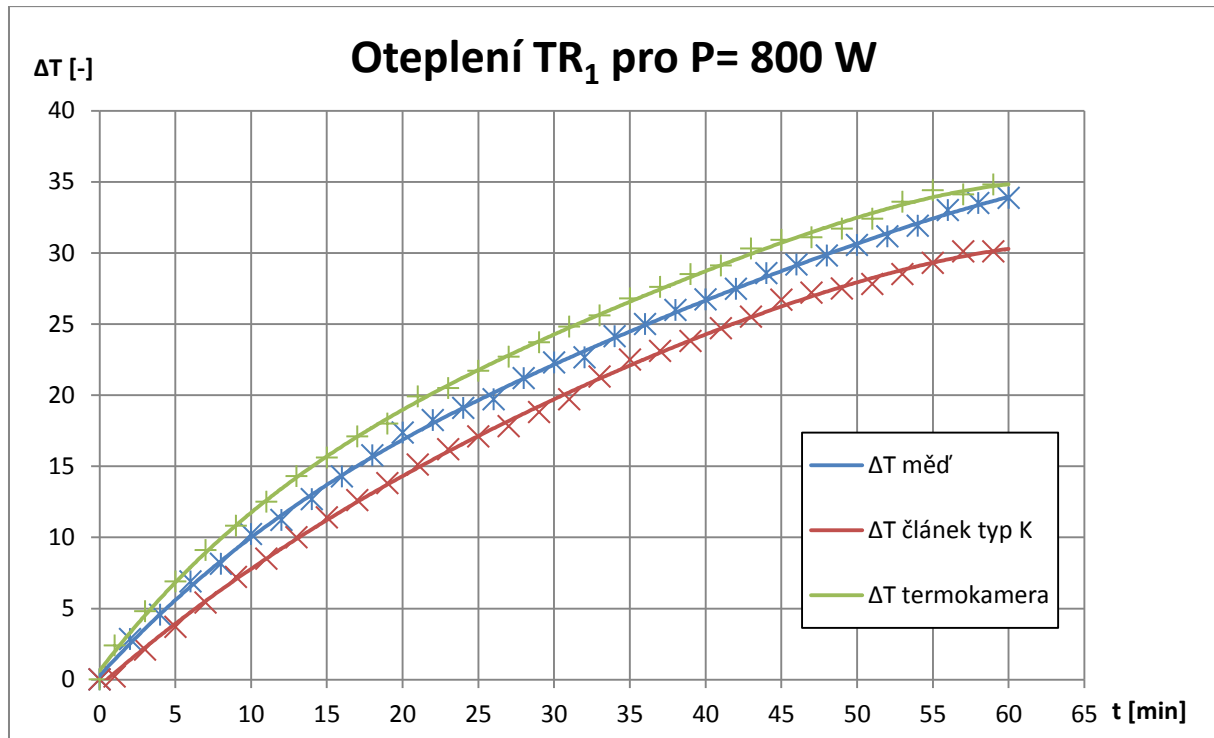
Z výše uvedených grafů pro oteplení v závislosti na výkonu lze pomocí rovnice přímky vypočítat maximální výkon v závislosti na tepelné třídě izolačního materiálu. Pro TR<sub>1</sub> nový s tepelnou třídou B 130 °C, vyšla hodnota  $P = 2\,637,3$  W a pro TR<sub>2</sub> starý s tepelnou třídou E 120 °C, (tepelná třída E byla odhadnuta na základě vizuálního prozkoumání transformátoru)

hodnota  $P = 637 \text{ W}$ . Pro správnost výpočtu je nutné odečíst teplotu okolí  $T_0 = 24 \text{ °C}$  od tepelné třídy.

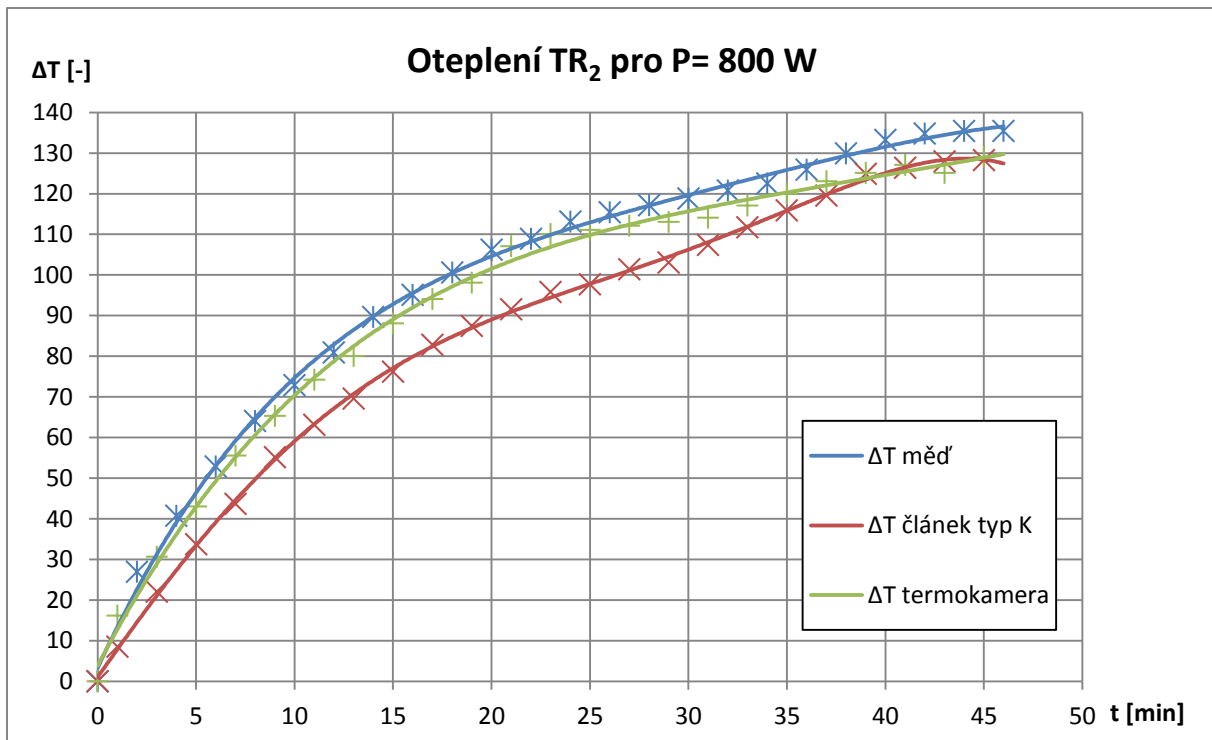


Při stejném postupu, který jsme aplikovali na rovnice přímky z grafu oteplení v závislosti na výkonu, lze vypočítat maximální proud  $I_{\max}$ , který se vynásobí jmenovitým napětím a

výsledkem je maximální výkon  $P_{\max}$ . Hodnoty pro  $TR_1$  jsou:  $I_{\max} = 7,34$  A,  $P_{\max} = 2789$  W a pro  $TR_2$  jsou:  $I_{\max} = 2,93$  A,  $P_{\max} = 674,6$  W



Z grafu pro měření oteplení různými způsoby měření teplot pro  $TR_1$  je viditelné, že rozdíl mezi metodami není nikterak vysoký a metody lze s určitou nepřesností uplatnit v praxi. Nejvyšší hodnotu naměřila termokamera FLIR, díky lesklému povrchu transformátoru. Naopak nejnižší hodnotu naměřil termočlánek typu K.



Z grafu oteplení s různými způsoby měření teplot pro TR<sub>2</sub> je viditelné, že nejlépe měří měď, která měří teplotu zevnitř pomocí vinutí. Termokamera dosáhla téměř obdobného výsledku z důvodu vysoké emisivity měřeného transformátoru. Rozdílem mezi termokamerou a termočlánkem typu K je způsoben nedokonalým tepelným přechodem mezi měřeným objektem a termočlánkem.

Více o problematice v kapitole 3.5. a 3.6.

#### 4.2.4 Měření nakrátko

Pracoviště bylo zapojeno dle schématu c) na Obr. 4.2. Sekundární vinutí je zkratováno, výstupní napětí  $U_2$  je tedy rovno nule. Napětí nakrátko  $U_{1k}$  je měřeno při proudu maximálního výkonu  $I_{1p}$  vypočítaného z předchozího měření, aby nedošlo k poškození vinutí vlivem přehřátí nebo mezizávitového zkratu.

V následující tabulce jsou zaznamenány hodnoty blízké proudu maximálního výkonu, který pro transformátor TR<sub>1</sub> vyšel 7,29 A, pro TR<sub>2</sub> 3,18 A.

TR1 nový		TR2 starý	
$I_P$ [A]	$U_{1k}$ [V]	$I_P$ [A]	$U_{1k}$ [V]
7,06	36,9	2,86	38,2
7,22	39,4	2,95	39,4
7,5	41,6	3,06	40,9
7,58	43,5	3,18	42,7

**Tab. 4.2** Tabulka zkratových napětí pro dané proudy.

Koeficient nakrátko je dán vztahem.

$$\varepsilon_{k1} = \frac{U_{1k}}{U_1} \cdot 100 = \frac{39,4}{380} \cdot 100 = 10,4 \%$$

$$\varepsilon_{k2} = \frac{U_{1k}}{U_1} \cdot 100 = \frac{39,4}{230} \cdot 100 = 17,1 \%$$



## 5. Zhodnocení

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s problematikou transformátorů, chlazení a měření jejich teploty. Dále bylo cílem změřit oteplení transformátorů různými způsoby s ohledem na jejich zatížení a způsob ochlazování.

V teoretické části je probrána problematika principu, konstrukce a výpočtů transformátorů. Dále se teoretická část zaměřuje na tepelné vlastnosti plastů a dalších izolačních materiálů využívaných při konstrukci transformátorů. Nakonec teoretické části se práce zaměřuje vhodné způsoby měření teploty.

Experimentální část porovnává vybrané způsoby měření teploty transformátoru. Dalším úkolem bylo zjistit štítkové údaje na základě teplotní třídy izolace. Měření se skládalo ze tří částí, měření naprázdno, měření při činné zátěži a měření nakrátko.

Ze získaných výsledků z měření naprázdno byly zjištěny jisté hodnoty ztrát naprázdno  $P_0$  u obou transformátorů, hodnoty reprezentující ztráty v mědi  $P_{Cu}$ , které jsou zanedbatelné. Dále z měření vyplynulo, že nový transformátor má větší magnetický rozptyl oproti starému. Také bylo zjištěno, ověřeno jmenovité napětí  $U_{10}$  a  $U_{20}$  podle polohy pracovních bodů.

Výsledky při činné zátěži ukázaly, že nejpřesnější způsob měření teploty je přes primární vinutí transformátoru. Nedostatkem této metody je problematická reprodukovatelnost z důvodu přechodového odporu na svorkách. V případě tmavého objektu je vhodné využít termokameru, která tmavé a matné objekty měří daleko přesněji než objekty světlé a lesklé. Nejmenší teplotu naměřil termočlánek typu K z důvodu nedokonalého tepelného přechodu. Dále byly zjištěny hodnoty maximálního výkonu  $P$  a maximálního proudu  $I$ .

V poslední části, kdy probíhalo měření nakrátko, bylo zjištěno napětí nakrátko  $U_{1k}$  a koeficient nakrátko  $\varepsilon_k$ . Výsledek měření je zobrazen v Tab. 5.1, která dokazuje, že metoda určení štítkových údajů s uvažováním tepelného systému, který je respektován tepelnou třídou izolace je zcela funkční.

	<b>TR<sub>1</sub> nový</b>	<b>TR<sub>2</sub> starý</b>
U <sub>1</sub> [V]	380	230
U <sub>2</sub> [V]	113	82
p [-]	3,37	2,8
P [W]	2637,3 - 2789	637 - 674,6
P <sub>0</sub> [W]	36	32
k [-]	-	-
ε <sub>k</sub> [%]	10,4	17,1

Tab 5.1 Štítkové údaje měřených transformátorů.

## 6. LITERATURA

- [1] Mentlík, V. a kol.: Diagnostika elektrických zařízení, BEN-technická literatura, Praha 2008
- [2] Kopilov, I.P. a kol.: Stavba elektrických stojů, SNTL, Praha 1988
- [3] Sazima, S. a kol.: Sdílení tepla, Praha 1993
- [4] Voženílek, P., Novotný, V., Mindl, P.: Elektromechanické měniče, nakladatelství ČVUT, Praha 2007
- [5] Mleziva, J.: Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití, Sobotáles, Brno 1993
- [6] Škeřík, J.: Plasty v elektrotechnice a elektronice, SNTL, Praha 1991
- [7] Staněk, V.: Nejistoty měření teploty, bakalářská práce, VUT FEKT Brno, Brno 2012
- [8] Janda, M.: Diagnostika zalévaných transformátorů, bakalářská práce, ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Plzeň 2012
- [9] Hindra, M.: Nedestruktivní diagnostické zkoušky prováděné u transformátorů, bakalářská práce, VUT FSI Brno, Brno 2010
- [10] Nevřivý, T.: Modelování jednofázového transformátoru malého výkonu, bakalářská práce, VUT FEKT Brno, Brno 2011
- [11] Nováček, V.: Návrh výkonového transformátoru, bakalářská práce, ZPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Plzeň 2012
- [12] Štajner, D.: Zalévací hmoty pro výkonovou elektroniku, bakalářská práce, VUT FEKT, Brno 2014
- [14] Hetflajš, M.: Výpočet chlazení transformátoru, Diplomová práce, VUT FEKT, Brno 2012
- [15] Kalabza, J.: Degradace izolačního systému transformátoru, bakalářská práce, ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Plzeň 2012
- [16] Moc, V.: Měření magnetických a tepelných vlastností malých transformátorů, úloha VVZ, ČVUT FEL, Praha 2013
- [17] Merhaut, D, Petr, J.: Výroba výkonových zařízení, doplňkový materiál k přednáškám, ČVUT FEL, Praha
- [18] Hájek, V.: Chlazení výkonových zařízení s využitím tepelných trubic, bakalářská práce, ČVUT FEL, Praha 2013
- [19] Specifikace termokamery FLIR <http://www.flir.co.uk/instruments/display/?id=65813>  
[22.5.2015]

## 7. PŘÍLOHY

Tab. 7.1.

<b>TR<sub>1</sub> "nový" naprázdno, měření číslo 1</b>				R <sub>cu</sub> [W]=	2,00
U <sub>1</sub> [V]	I <sub>1</sub> [A]	P [dílků]	kw	P [W]	U <sub>2</sub> [V]
0	0	0	0,5	0	0
10,1	0,04	0	0,5	0	3,0
21,2	0,05	1	0,5	0,5	6,4
32,2	0,06	1	0,5	0,5	9,7
41,4	0,07	2	0,5	1	12,4
52,2	0,07	3	0,5	1,5	15,9
61,8	0,08	4	0,5	2	18,7
70,6	0,09	2	1	2	21,2
81,3	0,10	3	1	3	24,2
90,7	0,11	4	1	4	27,0
101,1	0,11	4	1	4	30,2
110,3	0,12	5	1	5	32,9
120,9	0,13	6	1	6	36,0
131,4	0,14	3	2	6	39,1
141,4	0,14	4	2	8	42,1
150,4	0,15	4	2	8	44,7
160,2	0,17	5	2	10	47,9
171,2	0,17	5	2	10	51,1
180,1	0,19	5	2	10	54,0
191,4	0,19	6	2	12	57,1
200,2	0,20	6	2	12	60,1
211,8	0,21	7	2	14	63,5
220,7	0,22	8	2	16	66,3
231,4	0,23	8	2	16	69,4
241,5	0,24	9	2	18	72,3
251,2	0,25	5	4	20	75,3
261,3	0,26	5	4	20	77,9
270,2	0,27	5	4	20	80,2
280,9	0,28	5	4	20	83,9
289,2	0,29	6	4	24	86,5
301,5	0,32	6	4	24	90,1
311,4	0,33	6	4	24	93,1
320,3	0,34	7	4	28	95,5
331,7	0,37	7	4	28	99,1
340,4	0,39	7	4	28	101,8
350,4	0,41	8	4	32	104,7
360,8	0,43	8	4	32	107,4
372,0	0,47	9	4	36	111,2
380,8	0,49	9	4	36	113,4

393,9	0,57	10	4	40	117,5
-------	------	----	---	----	-------

Tab. 7.2.

<b>TR<sub>1</sub> "nový" naprázdno, měření číslo 2</b>				<b>R<sub>cu</sub> [W]=</b>	<b>2,00</b>
<b>U<sub>1</sub> [V]</b>	<b>I<sub>1</sub> [A]</b>	<b>P [dílků]</b>	<b>kw</b>	<b>P [W]</b>	<b>U<sub>2</sub> [V]</b>
0	0	0	0,5	0	0
11,5	0,014	0	0,5	0	3,4
21,9	0,035	0	0,5	0	6,6
31,5	0,048	1	0,5	0,5	9,5
41,4	0,059	2	0,5	1	12,5
50,6	0,065	3	0,5	1,5	15,3
60,1	0,080	4	0,5	2	18,2
70,6	0,086	2	1	2	21,2
80,4	0,091	3	1	3	23,9
91,2	0,106	4	1	4	27,1
101,0	0,110	4	1	4	30,2
110,5	0,118	5	1	5	32,9
120,8	0,129	6	1	6	36,0
130,1	0,131	3	2	6	28,8
140,1	0,145	3	2	6	41,9
150,0	0,154	4	2	8	44,8
161,2	0,160	4	2	8	48,1
170,6	0,170	5	2	10	50,8
180,7	0,176	5	2	10	54,0
189,2	0,186	6	2	12	56,6
201,2	0,200	6	2	12	60,4
210,7	0,207	7	2	14	63,3
219,5	0,221	7	2	14	65,3
231,7	0,228	8	2	16	69,4
241,0	0,238	9	2	18	71,7
250,2	0,253	4	4	16	75,0
259,5	0,265	5	4	20	77,5
270,6	0,270	5	4	20	80,8
281,3	0,284	5	4	20	83,8
290,6	0,294	6	4	24	86,8
302,2	0,320	6	4	24	90,0
312,6	0,329	6	4	24	93,6
321,4	0,349	7	4	28	95,8
330,0	0,359	7	4	28	98,3
340,7	0,381	7	4	28	101,4
351,4	0,413	8	4	32	104,6
361,8	0,434	8	4	32	107,9
370,9	0,460	9	4	36	110,5
382,2	0,510	9	4	36	113,8
393,9	0,568	10	4	40	117,5

Tab. 7.3.

<b>TR<sub>1</sub> "nový" naprázdno, měření číslo 3</b>				R <sub>cu</sub> [W]=	2,00
U <sub>1</sub> [V]	I <sub>1</sub> [A]	P [dílků]	kw	P [W]	U <sub>2</sub> [V]
0	0	0	0,5	0	0,0
11,8	0,007	0	0,5	0	3,4
20,4	0,035	0	0,5	0	6,0
32,3	0,045	1	0,5	0,5	9,5
41,5	0,059	2	0,5	1	12,3
51,1	0,072	3	0,5	1,5	15,2
60,2	0,076	4	0,5	2	18,0
70,4	0,087	2	1	2	21,0
82,3	0,098	3	1	3	24,5
92,4	0,104	4	1	4	27,5
100,9	0,114	4	1	4	30,1
111,4	0,116	5	1	5	33,4
121,6	0,129	6	1	6	36,2
133,4	0,140	3	2	6	39,8
140,7	0,145	4	2	8	42,1
151,7	0,148	4	2	8	45,3
163,0	0,162	5	2	10	48,7
173,7	0,174	5	2	10	51,9
181,7	0,183	5	2	10	54,5
193,8	0,194	6	2	12	57,6
201,3	0,202	6	2	12	60,4
212,0	0,206	7	2	14	63,5
221,7	0,218	8	2	16	66,4
232,7	0,232	8	2	16	69,5
240,6	0,241	8	2	16	71,6
251,8	0,250	4	4	16	75,2
262,7	0,263	5	4	20	78,4
272,2	0,276	5	4	20	81,1
281,6	0,284	5	4	20	84,4
291,5	0,301	6	4	24	87,1
300,1	0,315	6	4	24	89,6
311,4	0,334	6	4	24	92,8
321,4	0,350	7	4	28	95,7
333,4	0,367	7	4	28	99,7
343,9	0,391	8	4	32	103,0
350,1	0,407	8	4	32	104,9
362,7	0,437	8	4	32	108,3
370,9	0,460	9	4	36	110,7
381,1	0,495	9	4	36	113,9
390,0	0,536	10	4	40	116,4

Tab. 7.4.

<b>TR<sub>1</sub>"nový" naprázdno, měření číslo 4</b>				R <sub>cu</sub> [W]=	2,00
U <sub>1</sub> [V]	I <sub>1</sub> [A]	P [dílků]	kw	P [W]	U <sub>2</sub> [V]
0	0	0	0,5	0	0
5,3	0,007	0	0,5	0	1,5
14,9	0,028	0	0,5	0	4,3
25,3	0,038	1	0,5	0,5	7,5
36,2	0,055	1	0,5	0,5	10,6
47,2	0,064	2	0,5	1	14,0
55,0	0,070	3	0,5	1,5	16,4
66,5	0,088	2	1	2	19,9
75,5	0,089	3	1	3	22,5
86,0	0,101	3	1	3	25,7
97,7	0,114	4	1	4	29,1
107,3	0,119	5	1	5	32,0
116,7	0,126	6	1	6	34,9
124,5	0,134	3	2	6	37,2
136,1	0,140	3	2	6	40,6
147,5	0,152	4	2	8	44,1
156,4	0,158	4	2	8	46,8
165,4	0,161	5	2	10	49,2
175,7	0,168	5	2	10	52,8
187,1	0,186	6	2	12	55,8
194,9	0,197	6	2	12	58,3
204,9	0,202	6	2	12	61,2
216,9	0,210	7	2	14	64,4
225,9	0,221	8	2	16	67,6
233,2	0,236	8	2	16	69,6
245,2	0,240	4	4	16	73,2
255,8	0,261	4	4	16	76,4
264,6	0,266	5	4	20	78,8
274,9	0,278	5	4	20	82,2
284,4	0,291	5	4	20	85,3
294,5	0,307	6	4	24	88,2
305,8	0,322	6	4	24	91,4
314,9	0,333	6	4	24	94,3
326,5	0,357	7	4	28	97,6
334,7	0,368	7	4	28	100,3
346,2	0,400	8	4	32	103,2
354,3	0,420	8	4	32	105,8
363,2	0,433	8	4	32	108,7
376,5	0,483	9	4	36	112,1
385,4	0,512	9	4	36	114,8

Tab. 7.5.

<b>TR<sub>2</sub> "starý" naprázdno měření číslo 1</b>				R <sub>cu</sub> [Ω]=	3,09
U <sub>1</sub> [V]	I <sub>1</sub> [A]	P [dílků]	kw	P [W]	U <sub>2</sub> [V]
0	0	0	0,5	0	0
11,3	0	0	0,5	0	4,1
20,0	0,01	0	0,5	0	7,3
30,2	0,01	1	0,5	0,5	11,1
40,2	0,02	1	0,5	0,5	14,8
50,4	0,02	2	0,5	1	18,7
60,8	0,02	2	0,5	1	22,2
71,0	0,03	1	1	1	25,8
80,6	0,03	2	1	2	29,1
90,0	0,04	2	1	2	32,7
100,7	0,04	2	1	2	36,7
110,1	0,05	3	1	3	39,9
120,4	0,06	2	1	2	43,7
131,6	0,08	2	2	4	47,8
142,9	0,11	3	2	6	51,4
151,5	0,14	3	2	6	54,7
160,2	0,17	3	2	6	58,0
172,2	0,23	4	2	8	62,2
181,8	0,28	5	2	10	65,4
190,5	0,33	7	2	14	68,1
201,2	0,40	8	2	16	72,0
210,0	0,48	10	2	20	75,2
221,5	0,59	13	2	26	78,7
231,9	0,71	17	2	34	82,5



Tab. 7.6.

<b>TR<sub>2</sub> "starý" naprázdno měření číslo 2</b>				R <sub>cu</sub> [Ω]=	3,09
U <sub>1</sub> [V]	I <sub>1</sub> [A]	P [dílků]	kw	P [W]	U <sub>2</sub> [V]
0	0	0	0,5	0	0
10,8	0,01	0	0,5	0	3,9
21,8	0,01	0	0,5	0	8,0
30,2	0,02	1	0,5	0,5	11,0
41,4	0,02	1	0,5	0,5	15,2
50,3	0,03	2	0,5	1	18,5
60,3	0,03	2	0,5	1	22,0
71,8	0,03	1	1	1	26,2
80,2	0,03	2	1	2	29,1
92,0	0,04	2	1	2	33,6
101,3	0,05	2	1	2	36,8
112,2	0,05	3	1	3	40,8
120,6	0,06	3	1	3	43,7
130,2	0,08	2	2	4	47,2
142,2	0,10	2	2	4	51,6
151,0	0,14	3	2	6	54,6
162,2	0,18	3	2	6	58,8
170,1	0,22	4	2	8	61,3
181,2	0,27	5	2	10	65,3
191,5	0,34	7	2	14	69,1
202,0	0,42	9	2	18	72,4
210,5	0,48	10	2	20	75,3
221,4	0,59	13	2	26	79,2
231,0	0,71	16	2	32	82,3

Tab. 7.7.

<b>TR<sub>2</sub> "starý" naprázdno měření číslo 3</b>				R <sub>cu</sub> [Ω]=	3,09
U <sub>1</sub> [V]	I <sub>1</sub> [A]	P [dílků]	kw	P [W]	U <sub>2</sub> [V]
0	0	0	0,5	0	0
10,9	0,01	0	0,5	0	4,0
23,6	0,01	0	0,5	0	8,6
33,4	0,01	1	0,5	0,5	12,3
40,8	0,02	1	0,5	0,5	15,1
51,0	0,02	2	0,5	1	18,8
60,9	0,03	2	0,5	1	22,2
71,9	0,03	1	1	1	26,1
80,9	0,03	2	1	2	29,3
91,6	0,04	2	1	2	33,4
102,5	0,04	3	1	3	37,2
110,0	0,05	3	1	3	40,0
121,3	0,07	4	1	4	44,0
133,5	0,08	2	2	4	48,6
141,9	0,11	2	2	4	51,4
150,2	0,13	3	2	6	54,6
163,2	0,18	3	2	6	59,0
171,3	0,23	4	2	8	62,1
182,8	0,28	5	2	10	65,6
189,4	0,32	7	2	14	68,5
201,2	0,41	9	2	18	72,2
212,6	0,50	11	2	22	76,1
220,6	0,58	13	2	26	78,6
230,5	0,69	16	2	32	82,3

Tab. 7.8.

<b>TR<sub>2</sub> "starý" naprázdno měření číslo 4</b>				R <sub>cu</sub> [Ω]=	3,09
U <sub>1</sub> [V]	I <sub>1</sub> [A]	P [dílků]	kw	P [W]	U <sub>2</sub> [V]
0	0,00	0	0,5	0	0
5,6	0,01	0	0,5	0	1,9
16,0	0,01	0	0,5	0	5,7
26,4	0,01	0	0,5	0	9,5
36,2	0,01	1	0,5	0,5	13,0
45,0	0,02	1	0,5	0,5	16,3
56,4	0,02	2	0,5	1	20,5
62,1	0,02	1	1	1	22,5
75,9	0,03	1	1	1	27,7
86,4	0,03	2	1	2	31,3
96,8	0,04	2	1	2	35,2
106,0	0,05	3	1	3	38,7
114,7	0,05	3	1	3	41,6
122,1	0,06	2	2	4	44,1
135,1	0,09	2	2	4	49,0
146,7	0,12	2	2	4	53,0
156,2	0,15	3	2	6	56,5
164,8	0,19	4	2	8	59,7
174,7	0,24	5	2	10	63,5
188,1	0,31	6	2	12	67,8
195,7	0,37	8	2	16	70,2
206,5	0,45	10	2	20	74,1
214,2	0,51	12	2	24	77,0
225,3	0,63	15	2	30	80,5
236,3	0,78	18	2	36	84,4
242,3	0,88	20	2	40	86,0

Tab. 7.9.

<b>TR<sub>1</sub> "nový" zátěž, měření číslo 1</b>			
TKR <sub>Cu=</sub>	t [min]	R <sub>T</sub> [Ω]	ΔT [°C]
0,0039	0	2,07	0
U <sub>1</sub> [V] =	2	2,07	0,37
355,5	4	2,08	1,24
I <sub>1</sub> [A] =	6	2,09	3,10
1,649	8	2,11	4,59
P [W] =	10	2,11	5,21
600	12	2,12	5,82
U <sub>2</sub> [V] =	14	2,13	7,31
111,8	16	2,14	8,30
	18	2,14	9,17
	20	2,15	9,67
	22	2,15	10,53
	24	2,16	11,28
	26	2,17	13,01
	28	2,18	13,76
	30	2,18	14,25
	32	2,19	14,75
	34	2,19	15,37
	36	2,20	16,36
	38	2,21	16,98
	40	2,21	17,85
	42	2,22	18,22
	44	2,23	19,46
	46	2,23	19,70
	48	2,23	20,20
	50	2,24	20,94
	52	2,24	21,56
	54	2,25	21,94
	56	2,25	22,68
	58	2,26	23,42
	60	2,26	23,67
	62	2,26	24,04
	64	2,27	24,41
	66	2,27	24,66

Tab. 7.10.

<b>TR<sub>1</sub> "nový" zátěž, měření číslo 2</b>			
TKR <sub>Cu=</sub>	t [min]	R <sub>T</sub> [Ω]	ΔT [°C]
0,0039	0	2,08	0
U <sub>1</sub> [V] =	2	2,11	2,83
377,2	4	2,12	4,56
I <sub>1</sub> [A] =	6	2,14	6,90
2,194	8	2,15	8,13
P [W] =	10	2,17	10,22
800	12	2,17	11,21
U <sub>2</sub> [V] =	14	2,19	12,69
101,3	16	2,20	14,29
	18	2,21	15,76
	20	2,22	17,36
	22	2,23	18,23
	24	2,24	19,09
	26	2,24	19,70
	28	2,25	21,18
	30	2,26	22,29
	32	2,27	22,66
	34	2,28	24,14
	36	2,29	25,00
	38	2,29	25,99
	40	2,30	26,72
	42	2,31	27,46
	44	2,31	28,57
	46	2,32	29,19
	48	2,32	29,80
	50	2,33	30,54
	52	2,34	31,16
	54	2,34	31,90
	56	2,35	33,01
	58	2,35	33,50
	60	2,36	33,87

Tab. 7.11.

<b>TR<sub>1</sub> "nový" zátěž, měření číslo 3</b>			
TKR <sub>Cu=</sub>	t [min]	R <sub>T</sub> [W]	ΔT [°C]
0,0039	0	2,07	0
U <sub>1</sub> [V] =	2	2,15	9,42
355,5	4	2,20	16,23
I <sub>1</sub> [A] =	6	2,24	21,19
3,644	8	2,28	25,65
P [W] =	10	2,31	30,36
1300	12	2,34	34,08
U <sub>2</sub> [V] =	14	2,38	38,17
101,3	16	2,40	41,27
	18	2,41	42,63
	20	2,43	44,49
	22	2,44	46,35
	24	2,45	47,47
	26	2,47	50,07
	28	2,48	50,56
	30	2,49	51,55
	32	2,49	51,93

Tab. 7.12.

<b>TR<sub>2</sub> "starý" zátěž, měření číslo 1</b>			
TKR <sub>Cu=</sub>	t [min]	R <sub>T</sub> [Ω]	ΔT [°C]
0,0039	0	3,13	0
U <sub>1</sub> [V] =	2	3,19	4,4
232	4	3,21	6,5
I <sub>1</sub> [A] =	6	3,23	8,0
1,29	8	3,25	9,4
P [W] =	10	3,27	11,2
250	12	3,28	12,1
U <sub>2</sub> [V] =	14	3,30	13,6
80,5	16	3,31	14,6
	18	3,33	16,4
	20	3,35	17,3
	22	3,36	18,3
	24	3,37	19,0
	26	3,37	19,6
	28	3,39	20,5
	30	3,39	21,3
	32	3,40	22,1
	34	3,42	23,1
	36	3,42	23,7
	38	3,42	23,7

Tab. 7.13.

<b>TR<sub>2</sub> "starý" zátěž, měření číslo 2</b>			
TKR <sub>Cu=</sub>	t [min]	R <sub>T</sub> [Ω]	ΔT [°C]
0,0039	0	3,18	0
U <sub>1</sub> [V] =	2	3,22	3,4
231,1	4	3,24	5,4
I <sub>1</sub> [A] =	6	3,28	8,2
1,484	8	3,30	9,7
P [W] =	10	3,32	11,6
300	12	3,33	12,8
U <sub>2</sub> [V] =	14	3,35	14,1
79,9	16	3,37	15,4
	18	3,38	16,6
	20	3,40	18,0
	22	3,41	19,1
	24	3,43	20,3
	26	3,44	21,2
	28	3,45	21,9
	30	3,46	22,7
	32	3,47	23,7
	34	3,48	24,6
	36	3,48	24,7
	38	3,49	25,4
	40	3,50	26,4
	42	3,51	26,9
	44	3,52	27,6
	46	3,53	28,5
	48	3,53	28,8
	50	3,53	28,9
	52	3,54	29,2
	54	3,54	29,2

Tab. 7.14.

<b>TR<sub>2</sub> "starý" zátěž, měření číslo 3</b>			
TKR <sub>Cu=</sub>	t [min]	R <sub>T</sub> [W]	ΔT [°C]
0,0039	0	3,14	0
U <sub>1</sub> [V] =	2	3,42	22,5
231,8	4	3,62	39,2
I <sub>1</sub> [A] =	6	3,69	45,0
2,676	8	3,74	49,2
P [W] =	10	3,80	53,5
600	12	3,85	58,0
U <sub>2</sub> [V] =	14	3,88	60,3
75,9	16	3,91	62,5
	18	3,93	64,8
	20	3,96	67,1
	22	3,99	69,7
	24	4,01	70,9
	26	4,02	71,5
	28	4,03	72,8
	30	4,05	74,1
	32	4,07	75,8
	34	4,09	77,2
	36	4,10	78,1
	38	4,11	78,9
	40	4,11	79,2
	42	4,12	79,9
	44	4,12	80,2

Tab. 7.15.

<b>TR<sub>2</sub> "starý" zátěž, měření číslo 4</b>			
TKR <sub>Cu=</sub>	t [min]	R <sub>T</sub> [W]	ΔT [°C]
0,0039	0	3,14	0
U <sub>1</sub> [V] =	2	3,47	26,9
231,9	4	3,64	40,7
I <sub>1</sub> [A] =	6	3,79	52,9
3,635	8	3,93	64,1
P [W] =	10	4,03	72,9
800	12	4,13	80,9
U <sub>2</sub> [V] =	14	4,24	89,7
70,1	16	4,31	95,1
	18	4,37	100,6
	20	4,44	106,2
	22	4,47	108,9
	24	4,53	113,2
	26	4,55	115,5
	28	4,58	117,2
	30	4,60	118,8
	32	4,62	120,8
	34	4,64	122,5
	36	4,68	125,9
	38	4,73	129,9
	40	4,77	133,3
	42	4,79	134,8
	44	4,80	135,5
	46	4,80	135,5

Tab. 7.16.

Oteplení TR <sub>2</sub> "starý" pro P= 800 W					
čas	měď	článek typ K		termokamera	
[min]	$\Delta T$ [-]	T <sub>k</sub> [°C]	$\Delta T$ [-]	T <sub>t</sub> [°C]	$\Delta T$ [-]
0	0	23,1	0	24,9	0
1		31,6	8,5	41,1	16,2
2	26,9				
3		45,2	22,1	55,6	30,7
4	40,7				
5		56,8	33,7	67,9	43
6	52,9				
7		66,8	43,7	80,5	55,6
8	64,1				
9		78,3	55,2	90,2	65,3
10	72,9				
11		86,2	63,1	99,1	74,2
12	80,9				
13		92,7	69,6	105	80,1
14	89,7				
15		99,3	76,2	113	88,1
16	95,1				
17		105,9	82,8	119	94,1
18	100,6				
19		110,6	87,5	123	98,1
20	106,2				
21		114,7	91,6	132	107,1
22	108,9				
23		118,9	95,8	135	110,1
24	113,2				
25		120,8	97,7	136	111,1
26	115,5				
27		124,5	101,4	137	112,1
28	117,2				
29		126,2	103,1	138	113,1
30	118,8				
31		130,5	107,4	139	114,1
32	120,8				
33		134,8	111,7	142	117,1
34	122,5				
35		139	115,9	145	120,1
36	125,9				
37		142,6	119,5	148	123,1
38	129,9				



<b>Oteplení TR<sub>2</sub> “starý“ pro P= 800 W</b>					
čas	měď	článek typ K		termokamera	
[min]	$\Delta T$ [-]	T <sub>k</sub> [°C]	$\Delta T$ [-]	T <sub>t</sub> [°C]	$\Delta T$ [-]
39		148	124,9	150	125,1
40	133,3				
41		149,5	126,4	152	127,1
42	134,8				
43		151,1	128	150	125,1
44	135,5				
45		151,4	128,3	154	129,1
46	135,5				

Tab. 7.17.

<b>Oteplení TR<sub>1</sub> “nový“ pro P= 800 W</b>					
čas	měď	článek typ K		termokamera	
[min]	$\Delta T$ [-]	T <sub>k</sub> [°C]	$\Delta T$ [-]	T <sub>t</sub> [°C]	$\Delta T$ [-]
0	0	23,6	0	25,2	0
1		23,8	0,2	27,6	2,4
2	2,8				
3		25,7	2,1	30	4,8
4	4,6				
5		27,3	3,7	32,1	6,9
6	6,9				
7		29	5,4	34,3	9,1
8	8,1				
9		30,8	7,2	36	10,8
10	10,2				
11		32,1	8,5	37,7	12,5
12	11,2				
13		33,6	10	39,5	14,3
14	12,7				
15		35	11,4	40,8	15,6
16	14,3				
17		36,2	12,6	42,3	17,1
18	15,8				
19		37,4	13,8	43,2	18
20	17,4				
21		38,7	15,1	45,1	19,9
22	18,2				
23		39,8	16,2	45,7	20,5

Oteplení TR <sub>1</sub> pro P= 800 W					
čas	měď	článek typ K		termokamera	
[min]	$\Delta T$ [-]	Tk [°C]	$\Delta T$ [-]	Tt [°C]	$\Delta T$ [-]
24	19,1				
25		40,7	17,1	46,9	21,7
26	19,7				
27		41,4	17,8	47,9	22,7
28	21,2				
29		42,4	18,8	48,9	23,7
30	22,3				
31		43,3	19,7	50	24,8
32	22,7				
33		44,9	21,3	50,8	25,6
34	24,1				
35		46,1	22,5	52	26,8
36	25,0				
37		46,7	23,1	52,8	27,6
38	26,0				
39		47,4	23,8	53,7	28,5
40	26,7				
41		48,3	24,7	54,3	29,1
42	27,5				
43		49,1	25,5	55,5	30,3
44	28,6				
45		50,3	26,7	56,1	30,9
46	29,2				
47		50,8	27,2	56,3	31,1
48	29,8				
49		51,1	27,5	56,9	31,7
50	30,5				
51		51,4	27,8	57,6	32,4
52	31,2				
53		52,1	28,5	58,8	33,6
54	31,9				
55		52,9	29,3	59,6	34,4
56	33,0				
57		53,7	30,1	59,3	34,1
58	33,5				
59		53,7	30,1	60	34,8
60	33,9				