

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Oteplovací zkouška transformátoru

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David MAŠATA**
Osobní číslo: **E13B0055P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Oteplovací zkouška transformátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Uveďte možné způsoby a čidla používaná pro měření teploty.
2. Popište požadavky na provádění oteplovací zkoušky transformátorů.
3. Proveďte oteplovací zkoušku na vytipovaném transformátoru v laboratoři KEV.
4. Zpracujte a vyhodnoťte naměřená data.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Šobra**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na oteplovací zkoušku transformátoru. Obsahuje přehled možností měření teploty, typy teplotních čidel, normativní požadavky na oteplovací zkoušku, postup a popis měření a získané výsledky provedené zkoušky včetně grafického znázornění naměřených hodnot.

Klíčová slova

Transformátor, oteplovací zkouška, měření teploty.

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on transformer temperature rise test. Contains overview of temperature measurement possibilities and types of temperature sensors. Presents standards of transformer temperature rise test, contains the measuring process and its description and results of the test including temperature rise curve.

Keywords

Transformer, temperature rise test, temperature measurement.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 29.5.2016

David Mašata

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Šobrovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji své rodině za podporu během celého studia.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 ZPŮSOBY A ČIDLA PRO MĚŘENÍ TEPLoty	12
1.1 TEPLota	12
1.2 PRINCIPY MĚŘENÍ TEPLoty	12
1.3 NÁZVOSLOVÍ PŘÍSTROJŮ K MĚŘENÍ TEPLoty	12
1.4 DILATAČNÍ TEPLoměRY	13
1.4.1 Skleněné teploměry	13
1.4.2 Tlakové teploměry	14
1.4.3 Bimetalové teploměry	15
1.5 ELEKTRICKÉ TEPLoměRY	15
1.5.1 Odporové kovové senzory teploty	15
1.5.2 Odporové polovodičové senzory teploty	16
1.5.3 Termoelektrické články	17
1.6 BEZDOTYKOVÉ TEPLoměRY	18
1.6.1 Tepelné detektory infračerveného záření	19
1.6.2 Kvantové detektory infračerveného záření	19
1.6.3 Termokamery a pyrometry	20
1.7 DALŠÍ ZPŮSOBY STANOVENÍ TEPLoty	20
1.7.1 Indikátory teploty	21
1.7.2 Speciální teploměry	22
1.8 TEPLoměRY ZVOLENÉ PRO OTEPLOVACÍ ZKOUŠKU TRANSFORMÁTORU	22
2 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA TRANSFORMÁTORU	23
2.1 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA	23
2.2 NORMA ČSN EN 60076	23
2.3 NORMA ČSN EN 61558	23
2.4 MĚŘENÝ TRANSFORMÁTOR	24
2.5 POŽADAVKY NA OTEPLOVACÍ ZKOUŠKU	24

3	MĚŘENÍ.....	26
3.1	POSTUP MĚŘENÍ.....	26
3.2	NAMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY	28
3.3	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT – OTEPLOVACÍ KŘIVKY	30
3.4	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	31
4	ZÁVĚR	33
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	34

Úvod

Transformátory jsou základní pilíře elektrické rozvodné soustavy. Bez transformátorů by přenos elektrické energie, tak jak ho známe dnes, pravděpodobně ani nebyl možný. Na transformátory jsou proto kladeny velké nároky z hledisek technologických, funkčních a bezpečnostních. Jedním z bezpečnostních kritérií je, že transformátory nesmí při provozu dosahovat nadměrného oteplení. Toho se ověřuje oteplovací zkouškou.

Teplota, jako veličina určující stav látky nebo prostředí, je lidstvem pozorována od nepaměti a první pokusy o její měření se datují do vzdálené historie. V současné době je měření teplot aplikováno napříč různými odvětvími lidské činnosti. Díky tomu je dnes pro měření teploty k dispozici nepřeberné množství technologií a zařízení.

Předkládaná bakalářská práce má za cíl uvést přehled možností měření teploty a teplotních čidel. Dále uvést normativní požadavky pro oteplovací zkoušku a nakonec zkoušku provést na transformátoru v laboratoři Katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky a vyhodnotit výsledky provedené zkoušky.

Seznam symbolů a zkratk

A, B, C	Označení jednotlivých vinutí měřeného transformátoru
I	Elektrický proud [A]
$L1, L2, L3$	Fázové vodiče napájecí soustavy
MO	Magnetický obvod
n	Látkové množství [mol]
p	Tlak plynné látky [Pa]
p_s	Tlak syté páry [Pa]
R	Elektrický odpor [Ω]
R_m	Molární plynová konstanta [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]
T	Termodynamická teplota [K]
t	Teplota [$^{\circ}C$]
U	Elektrické napětí [V]
U_S	Sdružené napětí [V]
V	Objem kapalné látky [m^3]
V_0	Objem kapalné látky při referenční teplotě [m^3]
β	Součinitel teplotní objemové roztažnosti [K^{-1}]
Δt	Oteplení [$^{\circ}C$]
ε	Emisivita [–]

1 Způsoby a čidla pro měření teploty

1.1 Teplota

Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy tj. stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny. Teplota tedy udává, zda při vzájemném kontaktu dvou látek mezi nimi dojde k předání tepla, k čemuž dochází vždy z teplejší látky na chladnější. Dále jí lze definovat jako míru kinetické energie pohybu atomů látky – čím je vyšší rychlost pohybu částic, tím vyšší teplotu má těleso. [1]

1.2 Principy měření teploty

Základní princip měření teploty vychází z její definice, a tedy ze stavu termodynamické rovnováhy. Těleso, u kterého chceme měřit teplotu, přivedeme do styku se srovnávacím tělesem – teploměrem. Mezi tělesy dojde k tepelné výměně, tj. nastane stav termodynamické rovnováhy, a teplota teploměru je rovna teplotě tělesa. [2]

Samotnou hodnotu teploty je možné měřit pouze nepřímo, to znamená měřením jiných fyzikálních veličin, jejichž hodnota se mění v závislosti na teplotě. Změna hodnoty těchto veličin je poté převedena na změnu teploty. V praxi se využívá tří základních principů:

- *změna objemových vlastností látky*
- *změna elektrických vlastností látky*
- *měření energie teplotního záření*

Na základě těchto principů je možné rozdělit do tří skupin také používané teploměry na:

- *dilatační teploměry*
- *elektrické teploměry*
- *bezdotykové teploměry* [1][3]

1.3 Návosloví přístrojů k měření teploty

V souvislosti s měřením teploty se můžeme setkat s různými pojmenováními přístrojů a jejich částí, sloužících k měření teplot, které jsou často ekvivalentní.

Pojmenování jsou stanovena českou technickou normou ČSN 25 8005 - Návosloví z oboru měření teploty. V předkládané práci se vyskytují tato:

Teplotní senzor nebo *teplotní snímač* je samostatná konstrukční část teploměrového

zařízení, která obsahuje teplotní čidlo.

Teplotní čidlo je část snímače, převádějící teplotu na jinou vhodnou fyzikální veličinu. [1]

Teploměr je přístroj k měření teploty. Zpravidla označuje jediný celek, jehož funkční členy jsou nerozebíratelně spojeny nebo se společně dodávají a užívají jako jediné měřidlo.

Pyrometr je měřicí zařízení k indikaci teploty, jehož čidlo není ve styku s měřenou látkou a jehož údaj je odvozen z elektromagnetické záření vysílaného tělesem, jehož teplota se zjišťuje. [4]

Detektor záření je zařízení schopné zjišťovat přítomnost zářivé energie a měřit ji. Funguje jako měnič neelektrické (zářivé) energie na elektrickou. [5] Prakticky se tedy jedná o teplotní senzor v bezdotykovém měření teplot a bývá tak také označován.

1.4 Dilatační teploměry

Dilatační teploměry využívají pro stanovení změny hodnoty teploty změnu objemových vlastností látky. Těmi jsou změna tlaku u tlakových teploměrů, změna objemu u skleněných teploměrů a délková roztažnost u bimetalových teploměrů.

1.4.1 Skleněné teploměry

Skleněné teploměry jsou jedny z nejběžnějších a nejpoužívanějších teploměrů vůbec. Využívají objemové roztažnosti kapalných látek dané vztahem:

$$V = V_0(1 + \beta T) \quad (1.1)$$

Nejčastěji jsou plněné rtutí, která je však v současné době kvůli toxicitě zakázána a nahrazována jinými látkami například etanolem. Teploměrná látka je umístěna v baňce napojené na měřicí kapiláru, do níž je při zvýšení teploty a zvětšení objemu látka vytlačována a podle výšky hladiny se ze stupnice umístěné pod kapilárou odečítá hodnota teploty. Celý tento systém bývá umístěn ve skleněné trubici, z čehož vyplývá hlavní nevýhoda těchto teploměrů, kterou je křehkost. Měřicí rozsah je od $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1]



Obr. 1: Skleněný teploměr [6]

1.4.2 Tlakové teploměry

Tlakové teploměry lze rozdělit do tří podskupin podle skupenství látky využívané ke stanovení teploty.

Kapalinové tlakové teploměry

Kapalinové teploměry využívají stejně jako skleněné teploměry objemovou roztažnost kapalně teploměrné látky. Mají však teploměrný systém zcela naplněn a roztažnost v závislosti na teplotě se zde projevuje změnou tlaku látky a je měřena deformačním tlakoměrem. Jako náplň se používá rtuť, xylen nebo metylalkohol a podle použité látky se rozsah teplot pohybuje od -45 °C do 500 °C

Tenzní tlakové teploměry

Tyto teploměry mají teploměrný systém naplněn z části kapalinou a z části její sytou párou a tato skupenství jsou navzájem v rovnováze. To znamená, že v teploměrném ústrojí teploměru je tlak, jehož hodnota je nejnižší možná pro udržení kapalného skupenství látky a nejvyšší pro plynné skupenství. Tento tlak je teplotně závislý podle vztahu:

$$\log p_s = D + \frac{E}{T} + FT \quad (1.2)$$

Kde D , E a F jsou konstanty dané použitou teploměrnou látkou. Závislost tlaku a tedy i teploměrová stupnice jsou nelineární a tyto teploměry se vyrábějí s rozsahem teplot -40 °C až 230 °C . [1] [7]

Plynové tlakové teploměry

Funkce plynových tlakových teploměřů vychází ze stavové rovnice plynu:

$$p = \frac{nR_m}{V} T = kT \quad (1.3)$$

Jelikož n a R jsou konstanty pro daný plyn, platí mezi tlakem a teplotou při konstantním objemu lineární vztah. Teploměr se skládá z baňky naplněné plynem, spojovací kapiláry a měřicího ústrojí – tlakoměru. Mezi používané plyny patří dusík, vzduch nebo hélium. Z toho vyplývá hlavní výhoda tohoto teploměru, kterou je netoxická teploměrná látka. Teplotní rozsah je od -250 °C do 800 °C . [1]

1.4.3 Bimetalové teploměry

Bimetal (dvojkovy) jsou dva navzájem spojené pásky z kovů o rozdílné tepelné roztažnosti. Při změně teploty dojde u každého z pásků k jinému rozpínání a jejich spojení způsobí deformaci pásku, konkrétně se pásek prohne na stranu kovu s nižším součinitelem roztažnosti. Tento pásek je základem bimetalového teploměru. Na jedné straně je pevně upevněn a pohyb druhého konce je převeden na pohyb ukazatele po teplotní stupnici. Mezi používané kovy patří hliník, měď, chrom, železo, nikl, cín a jejich slitiny. Čím vyšší je rozdíl koeficientů jednotlivých kovů, tím citlivější je daný teploměr. Rozsah je od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nevýhodami jsou větší nepřesnost měření a delší časová odezva. [1]



Obr. 2: Bimetalový teploměr [8]

1.5 Elektrické teploměry

Elektrické teploměry využívají závislost elektrických veličin na teplotě. Těmi jsou změna odporu kovových nebo polovodičových materiálů s měnící se teplotou nebo termoelektrický jev, což je vznik elektrického napětí na konci dvou vodičů, mezi kterými je teplotní rozdíl.

1.5.1 Odporové kovové senzory teploty

Hodnota odporu kovových materiálů je závislá na teplotě, konkrétně s rostoucí teplotou vzrůstá také odpor materiálu. Této závislosti využívají odporové kovové senzory teploty. Vyrábí se z čistých kovů, nejčastěji z platiny s měřicím rozsahem od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, dále z niklu, který se vyznačuje vyšší citlivostí, ale nižším rozsahem od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

do 200 °C, nebo z mědi s nejmenším rozsahem od -50 °C do 150 °C.

Součástí těchto senzorů teploty jsou elektronické měřicí obvody, ve kterých na základě změny odporu dochází ke změně parametrů obvodu a z těchto změn je stanovena hodnota teploty buď analogovými měřicími přístroji, nebo je A/D převodníky převedena na digitální výstup. [3]



Obr. 3: Různá provedení odporových teplotních senzorů s platinovým čidlem PT100 [9]

1.5.2 Odporové polovodičové senzory teploty

Odporové polovodičové senzory teploty využívají závislost hodnoty odporu polovodičových materiálů na teplotě. Do této skupiny patří elektronické součástky *termistory*, což jsou teplotně závislé odpory (z polovodičových materiálů). Rozdělují se na dva typy:

PTC termistory, u kterých se odpor s rostoucí teplotou zvyšuje, vyrábí se z polykrystalické feroelektrické keramiky a jako senzory teploty se příliš nepoužívají, jelikož jsou vhodné pouze na měření v úzkém intervalu teplot.

NTC termistory, jejichž odpor naopak s rostoucí teplotou klesá, se vyrábí z oxidů kovů a mají teplotní rozsah běžně od -50 °C do 150 °C ve specifických případech až do 1000 °C. Obecně se termistory vyznačují velkou citlivostí a malými rozměry a patří mezi nejpoužívanější senzory teploty v elektronice.

Dále lze mezi odporové polovodičové senzory teploty zařadit *monokrystalické polovodičové senzory teploty*, které využívají závislost odporu monokrystalického polovodiče na teplotě danou teplotní závislostí pohybu nosičů v daném materiálu. Vyrábějí se nejčastěji z křemíku (pro průmyslové použití, s rozsahem teplot od -50 °C do 150 °C) a

dále z germania, či india.

Odporové polovodičové senzory teploty opět pro převod změny odporu na změnu teploty využívají elektronické obvody stejně jako kovové odporové senzory teploty. [1] [3]



Obr. 4: Digitální teploměr s termistorovým senzorem [10]

1.5.3 Termoelektrické články

Termočlánky patří mezi nejlevnější a nejjednodušší snímače teploty. Fungují na principu termoelektrického jevu. Tím je vznik elektrického napětí na koncích vodičů, mezi kterými je teplotní rozdíl. Jedná se tedy o převod tepelné energie na elektrickou. Článek je tvořen dvěma vodiči z různých materiálů na obou koncích vodičů spojených. Pokud je teplota spojů rozdílná, vzniká mezi spoji termoelektrické napětí a obvodem protéká proud. Velikost napětí je závislá na teplotním rozdílu a na jejím základě je určována hodnota teploty.

Termočlánky se dělí podle použitých dvojic materiálů, ze kterých jsou vyrobeny, a s tím souvisejících parametrů:

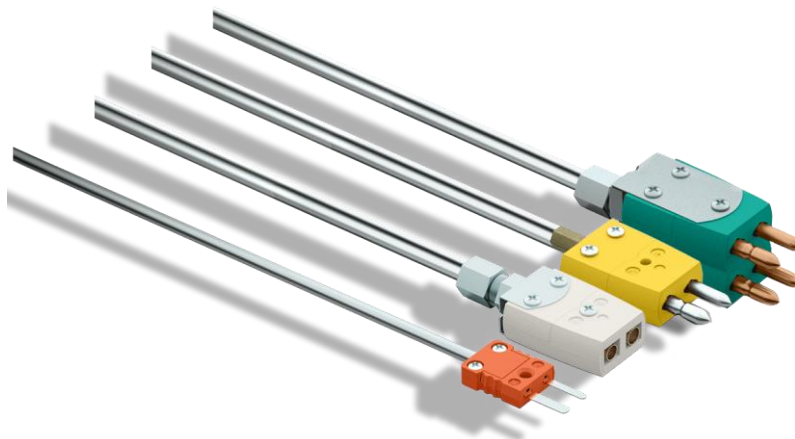
Typ T z materiálu vodičů měď a měď-nikl s měřicím rozsahem $-200\text{ °C} - 400\text{ °C}$.

Typ J z materiálu vodičů železo a měď-nikl s měřicím rozsahem $-200\text{ °C} - 600\text{ °C}$.

Typ K z materiálu vodičů nikl a nikl-chrom s měřicím rozsahem $-50\text{ °C} - 1000\text{ °C}$.

Typ S z materiálu platina-rhodium a platina s měřicím rozsahem $0\text{ °C} - 1300\text{ °C}$.

Hodnotu napětí v obvodu termočlánku je dále nutné převádět na změnu hodnoty teploty. K tomu se využívá magnetoelektrických měřicích přístrojů nebo je výstupní analogový signál převáděn A/D převodníkem na digitální, který je zpracován elektronicky a zobrazen na digitální display. [3]



Obr. 5: Různá provedení termočláňkových senzorů [11]

1.6 Bezdotykové teploměry

Bezdotykové měření teploty je považováno za nejmodernější způsob zjišťování teploty, avšak v současné době je možné se s těmito teploměry setkat ve stále více odvětvích nejen technické praxe.

Jiným názvem bezdotykového měření teploty je infračervená pyrometrie. Tento název reflektuje princip fungování těchto teploměrů, kterým je určování teploty tělesa měřením energie infračerveného záření vyzařované tělesem.

Jedná se elektromagnetické záření, které do svého okolí vyzařuje jakékoliv hmotné těleso a pohybuje se ve vlnových délkách $0,78 \mu\text{m} - 1 \text{ mm}$. Současné bezdotykové teploměry využívají konkrétně spektrum od $0,4 \mu\text{m}$ do $25 \mu\text{m}$ (tedy zasahující i do viditelného spektra) a tento rozsah jim umožňuje měření teplot od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $10\,000 \text{ }^\circ\text{C}$

Výhodou těchto teploměrů je, jak je již z názvu patrné, že pro měření není nutný kontakt s měřeným tělesem. Díky tomu zde nedochází k ovlivnění teploty tělesa čidlem, je možné takto měřit i pohybující se objekty, a také objekty, ke kterým se z bezpečnostních důvodů není možné přiblížit. Nevýhodou tohoto měření jsou větší nepřesnosti způsobené náchylností tohoto měření k ovlivnění vnějšími vlivy (prostupnost záření prostředím mezi čidlem a objektem, parazitní odražené záření z okolí na objekt). [1]

Dále je nutné u bezdotykového měření těles znát hodnotu tzv. **emisivity** (ϵ) tělesa, což je poměr energie vyzařované měřeným tělesem k energii, kterou by vyzařovalo černé těleso při stejné teplotě. Černé těleso je idealizovaný objekt, který při dané teplotě vyzáří nejvyšší možné množství energie. Emisivita reflektuje, že reálné těleso vždy vyzařuje menší množství energie a nabývá tedy hodnot 0 až 1. V případě špatně určené hodnoty emisivity dochází k nepřesnému stanovení teploty. [12]

1.6.1 Tepelné detektory infračerveného záření

Tepelné detektory infračerveného záření jsou tvořeny aktivní plochou, na kterou dopadá elektromagnetické záření vyzářené měřeným objektem. Plocha toto záření pohlcuje a tím zvyšuje svoji teplotu, která je detektorem měřena. Jelikož se poté již jedná o kontaktní měření teploty, je tato hodnota měřena nepřímo a využívají se principy popsané u výše uvedených typů teploměrů. [5] Podle použitého principu se tyto detektory rozdělují do tří skupin:

Termoelektrické detektory využívají termoelektrického jevu, a tedy fungují jako termoelektrické články. Na aktivní ploše je větší množství sériově řazených termočlánků a mimo běžných materiálů pro termočlánky se využívá také například bismut nebo antimon s lepším termoelektrickým koeficientem.

Bolometry využívají změnu odporu látky v závislosti na teplotě, a tedy fungují jako odporové kovové senzory teploty. Jako odporové materiály se používají oxidy hořčíku, manganu, niklu, titanu, vanadu a jiných. Jednotlivé senzory lze na ploše uspořádat do matic, čehož se využívá v termovizních kamerách.

Pyroelektrické detektory využívají pyroelektrického jevu, což je změna spontánní polarizace při změně teploty. Změna polarizace se projevuje změnou náboje, která je detektorem analyzována. [1]

1.6.2 Kvantové detektory infračerveného záření

Kvantové detektory infračerveného záření, jiným názvem fotodetektory, využívají fotoelektrický jev. Elektromagnetické záření dopadající na těleso má určitou energii. Po absorbování záření tělesem je jeho energie využita z části na překonání přitažlivých sil poutajících elektrony a zbývající energie je přeměněna na kinetickou energii vyražených elektronů. Dochází tedy k přeměně elektromagnetického záření na elektrickou energii. Na principu tohoto jevu fungují fotocitlivé elektronické součástky, jako jsou fotodiody a fotorezistory, které se v kvantových detektorech infračerveného záření využívají. Vlivem dopadajícího záření tedy dochází ke změně elektrických parametrů v obvodu detektoru a tato změna je analyzována pro určení teploty. Kvantové detektory jsou citlivější než tepelné, avšak některé typy vyžadují chlazení detekčního systému na velmi nízké teploty. [5] [12]

1.6.3 Termokamery a pyrometry

Jako termokamery a pyrometry jsou souhrnně označovány přístroje pro bezdotykové měření teplot, které využívají výše uvedené detektory infračerveného záření.

Pyrometry měří teplotu pouze v jednom bodě (popř. průměrnou hodnotu teploty v měřené oblasti) a obsahují tedy pouze jeden senzor infračerveného záření. Rozdělují na širokopásmové pyrometry, které měří v širokém spektru elektromagnetického záření, a úzkopásmové, které pracují vždy pouze v určité části vlnových délek infračerveného záření v souvislosti s požadavky na použití daného přístroje.

Termokamery obsahují více infračervených senzorů poskládaných do matice a jejich výstupem je teplotní mapa, tedy rozložení teplot v jednotlivých bodech po celém povrchu měřeného objektu. Rozlišení termokamer (odpovídající počtu senzorů) se pohybuje od 100 x 100 pixelů (10 000 senzorů) do 640 x 480 a výše (přes 300 000 senzorů). [12]



Obr. 6: Pyrometr [13]



Obr. 7: Termokamera [14]

1.7 Další způsoby stanovení teploty

Všechny dosud uvedené teploměry patří mezi nejběžněji používané a respektující rozdělení uvedené v odstavci 1.2. V některých aplikacích buďto parametry běžných teploměrů nedostačují, nebo není možné žádnou z daných technologií použít a je nutné využít speciální způsoby stanovení teploty. Také se můžeme setkat s případem, kdy není nutné znát přesnou hodnotu teploty, ale je potřeba pouze signalizace dosažení určité hodnoty. K tomuto slouží indikátory teploty.

1.7.1 Indikátory teploty

Indikátory teploty využívají látky, u kterých dojde při dosažení konkrétní teploty k definované změně indikátoru.

Nevratné indikátory teploty

U nevratných indikátorů teploty dochází po překročení indikované teploty k nenávratné změně. Do této kategorie patří keramické žároměrky, což jsou keramické jehlánky, které při vysokých teplotách měknou a ohýbají se. Používají se v keramickém průmyslu. Dalším aplikací nevratných indikátorů je kontrola dodržení provozních teplot zařízení. Využívají se teploměrné tablety nebo kapaliny, které se teplotou roztaví nebo speciální barvy, které po překročení kritické teploty zčernají.

Vratné indikátory teploty

Mezi vratné indikátory teploty patří teploměrné nálepky, na kterých jsou aplikované vratné teploměrné barvy a mohou obsahovat i hrubou teplotní stupnici. Vratné indikátory s vyšší citlivostí a velmi rychlou reakcí na změnu teploty fungují na bázi kapalných krystalů. Kapalně krystaly mění v závislosti na teplotě své vlastnosti, v důsledku čehož dochází ke změně indexu lomu a odrazivosti světla a tím pádem se s měnící teplotou mění barva indikátoru.

Do obou kategorií je možné zařadit teploměrové tužky, kterými lze velmi jednoduše aplikovat na měřený objekt teplotcitlivou stopu, která se po překročení kritické teploty vratně (změna barvy) nebo nevratně (roztavení a ztmavnutí) změní. [1][3]



Obr. 8: Teploměrná nálepka se stupnicí s nevratnou změnou barvy [15]

1.7.2 Speciální teploměry

V dalších specifických aplikacích se dále můžeme setkat s těmito typy teploměrů a senzorů teploty:

Akustické teploměry využívající závislost rychlosti šíření zvuku na teplotě. Využívají se plynné nebo pevné látky a teploměr je určen pro měření velmi nízkých (2 – 20 K) nebo velmi vysokých teplot (750 – 3000 K).

Krystalové teploměry, které využívají teplotní závislost rezonančního kmitočtu křemenného výbrusu. Vyznačují se velmi velkou přesností v řádu desetin stupňů.

Magnetické teploměry využívající teplotní závislost magnetické susceptibility některých materiálů. Používají se pro měření velmi nízkých teplot (10 mK – 80 K).

Optické vláknové senzory teploty jsou tvořeny optickým vláknem s určitými přenosovými vlastnostmi, které jsou závislé na teplotě. Této závislosti je využíváno pro stanovení hodnoty teploty. [1]

1.8 Teploměry zvolené pro oteplovací zkoušku transformátoru

Záznamník teploty TESTO 175 T3

Záznamník teploty TESTO 175 T3 je určen k automatickému měření a zaznamenávání hodnot teplot získaných ze dvou termočlánekových sond:

Typu K (NiCr – Ni) s rozsahem teplot 50°C až 1000°C a rozlišením 0,1° C.

Typu T (Cu – CuNi) s rozsahem teplot 50°C až 400°C a rozlišením 0,1° C.

Disponuje pamětí až 1 000 000 naměřených hodnot, které je možné přenést z přístroje do počítače, a také zobrazuje aktuální teplotu z obou čidel na displeji. Toho využijeme při oteplovací zkoušce, jelikož budeme první sondou měřit teplotu vždy na izolacích všech tří vinutí transformátoru a magnetickém obvodu a druhou zaznamenávat teplotu okolí. Při našem měření využijeme obě sondy typu K. [16]

Vizuální infračervený teploměr FLUKE VT04

Vizuální infračervený teploměr FLUKE VT04 patří do kategorie bezdotykových teploměrů. Měří a zobrazuje na displeji teplotní mapu měřeného objektu, umožňuje její export do počítače a pomocí středového rámečku umožňuje okamžité zobrazení aktuální hodnoty teploty na požadované části objektu. Přístrojem budeme měřit teploty na izolacích vinutí souběžně s měřením záznamníkem TESTO. [17]

2 Oteplovací zkouška transformátoru

2.1 Oteplovací zkouška

Průchodem proudem transformátorem dochází ke vzniku činných ztrát, které se projevují zahříváním částí transformátoru. Transformátory nesmějí při normálním použití důsledkem těchto ztrát dosahovat nadměrné teploty dané normativně podle třídy materiálu izolace. Zda k tomu nedochází, se ověřuje oteplovací zkouškou.

Transformátor je při zkoušce zatížen jmenovitou zátěží a teplota jednotlivých částí je měřena až do ustálení teplotního stavu. Z naměřených hodnot lze poté sestavit oteplovací křivku, tj. závislost oteplení transformátoru na čase. Teplotu vinutí není možné měřit přímo, a proto se hodnota oteplení určuje na základě změny odporu vinutí na začátku a konci zkoušky. [18] [19]

2.2 Norma ČSN EN 60076

Požadavky na oteplovací zkoušku výkonových transformátorů jsou stanoveny českou technickou normou ČSN EN 60076 – Výkonové transformátory.

Tato norma se zabývá jednofázovými nebo třífázovými výkonovými transformátory s výkonem větším než 1 kVA u jednofázových a 5 kVA u trojfázových s alespoň jedním vinutím se jmenovitým napětím vyšším než 1000 V. [20] Požadavky na oteplovací zkoušku transformátoru jsou stanoveny v částech:

- ČSN EN 60076-2 Část 2: Oteplení transformátorů ponořených do kapaliny [21]
- ČSN EN 60076-11 Část 11: Suché transformátory [22]
- ČSN EN 60076-15 Část 15: Výkonové transformátory plněné plynem [23]

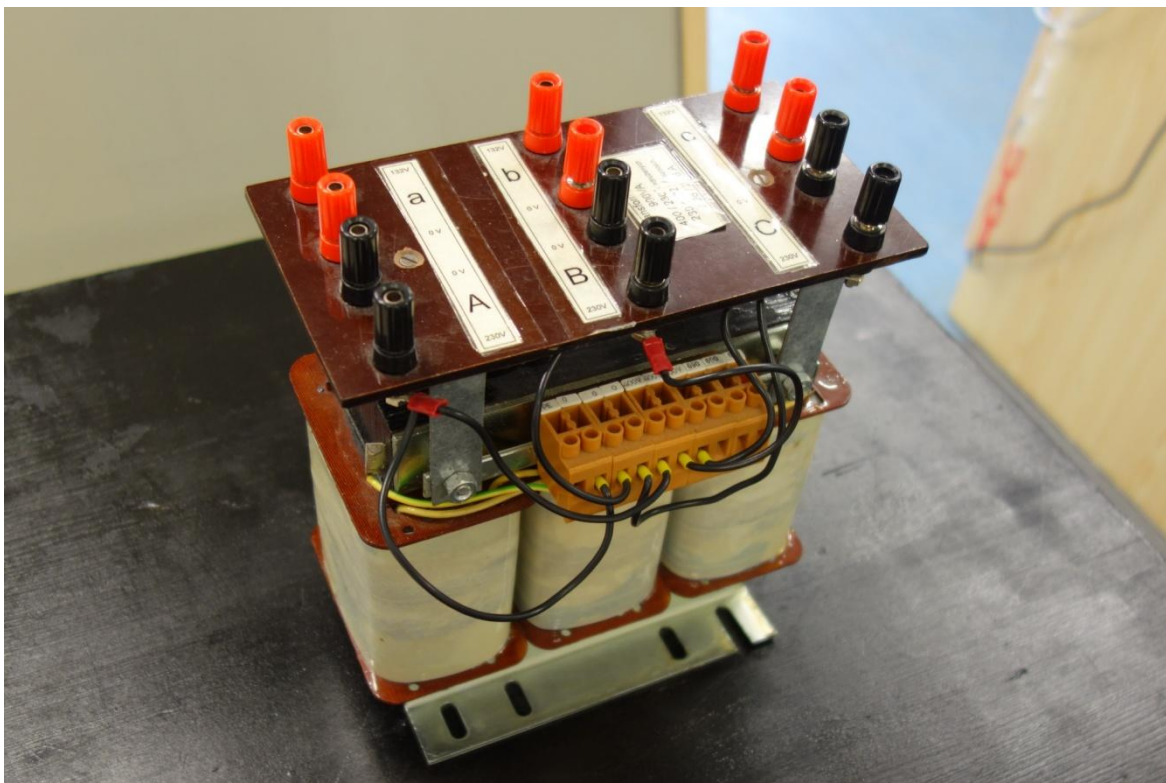
2.3 Norma ČSN EN 61558

Norma ČSN EN 61558 – Bezpečnost výkonových transformátorů, napájecích zdrojů, tlumivek a podobných výrobků všeobecně stanovuje bezpečnostní požadavky pro transformátory. V první části (tj. ČSN EN 61558-1 Část 1: Všeobecné požadavky a zkoušky) jsou uvedeny požadavky na bezpečnostní zkoušky, včetně oteplovací zkoušky. Norma je platná pro suché přenosné a nepřenosné oddělovací a bezpečnostní ochranné transformátory, transformátory s odděleným vinutím, autotransformátory, proměnné transformátory, malé tlumivky a napájecí zdroje. Podle kategorie určuje norma maximální parametry transformátoru až do hodnoty výkonu 40 kVA a výstupního napětí 1000 V. [19]

2.4 Měřený transformátor

Oteplovací zkoušku v rámci bakalářské práce budeme provádět na suchém trojfázovém transformátoru o výkonu 900 VA s napětím 400/230 V sdružených a 230/132 V fázových.

Na transformátor s těmito parametry se nevztahuje výše uvedená norma ČSN EN 600076, avšak je v ní uvedeno, že pokud pro transformátor neexistuje vlastní norma, je možné použít tuto normu buď vcelku, nebo částečně. [20] V normě ČSN EN 61551 jsou uvedeny upřesňující požadavky pro oteplovací zkoušku malých přenosných transformátorů a je zde popsána metoda určení teploty vinutí pomocí změny odporu. Proto budeme zkoušku provádět dle požadavků z obou těchto norem uvedených v následujícím odstavci 2.5.



Obr. 9: Měřený transformátor

2.5 Požadavky na oteplovací zkoušku

Požadavky dle ČSN EN 60076

- Při oteplovací zkoušce je transformátor zatěžován metodou přímého zatížení, tj. jedno vinutí transformátoru, přednostně vnitřní vinutí, se napájí jmenovitým napětím a druhé vinutí se připojí k vhodné zátěži tak velké, aby oběma vinutími protékal jmenovitý

proud.

- Konečného oteplení transformátoru je dosaženo, když se oteplení stává konstantním. Za dosažení této podmínky se považuje nižší hodnota ze stavů, kdy se oteplení nemění rychleji než o 2% příslušného oteplení za 1 hodinu nebo 2 K za jednu hodinu. [22]

Požadavky dle ČSN EN 61558

- Přenosné transformátory se umístí na podložku z překližky, opatřenou matným černým nátěrem. Podložka je přibližně 20 mm silná a má rozměry, které nejméně o 200 mm přesahují rozměry pravoúhlého průmětu vzorku na podložku.
- Teploty vinutí se určují metodou změny odporu. Hodnota oteplení vinutí se počítá podle tohoto vzorce:

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (234,5 + t_1) - (t_2 - t_1) \quad (2.1)$$

kde Δt oteplení;

R_1 odpor na začátku zkoušky při teplotě t_1 ;

R_2 odpor na konci zkoušky, po dosažení ustáleného stavu;

t_1 teplota okolí na začátku zkoušky

t_2 teplota okolí na konci zkoušky

- Při určování teploty vinutí se měří teplota v okolí v takové vzdálenosti od vzorku, aby nedošlo k ovlivnění údaje teploty.
- Ostatní teploty se určí pomocí termočlánků zvolených a umístěných tak, aby měly co nejmenší vliv na teplotu zkoušené části.
- Teplota elektrické izolace (jiné než izolace vinutí) se určuje na povrchu izolace v místech, kde by porušení izolace mohlo způsobit kontakt mezi nebezpečnými živými částmi a přístupnými vodivými částmi, nebo zmenšení povrchových cest nebo vzdušných vzdáleností pod předepsané hodnoty. Navíc musí být termočlánky v místě s nejvyšší teplotou izolantu, aby se zabránilo riziku ohně. [19]

3 Měření

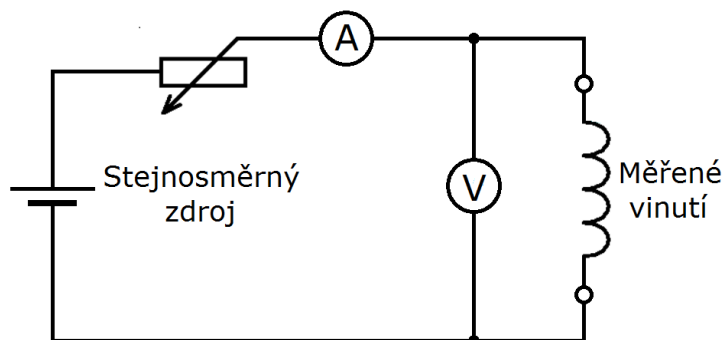
3.1 Postup měření

Metoda změny odporu

Hodnoty odporů vinutí transformátoru jsme stanovili Ohmovou metodou. Jednotlivá vinutí jsme postupně připojili ke stejnosměrnému zdroji napětí do série s proměnným odporem. Hodnotu odporu vinutí jsme stanovili z napětí a proudu protékajícího vinutím pomocí Ohmova zákona:

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.1)$$

Oteplení vinutí jsme poté spočítali pomocí rovnice (2.1) z rozdílu odporů vinutí před začátkem oteplovací zkoušky tj. před připojením zátěže a napájení a poté po dosažení ustálené hodnoty teploty ihned po odpojení napájení.



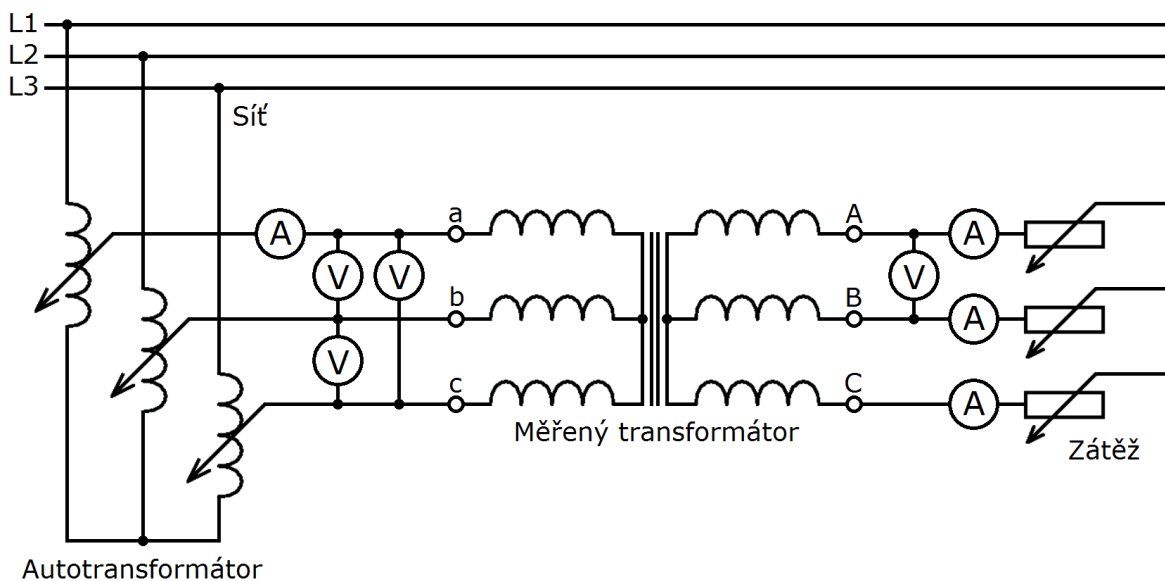
Obr. 10: Schéma zapojení měření odporů vinutí jednotlivých fází

Metoda přímého zatížení

Měřený transformátor jsme umístili na podložku z překližky o rozměrech 55 x 55 cm natřenou matným černým nátěrem. Z autotransformátoru jsme napájeli všechny tři fáze strany nižšího napětí jmenovitou hodnotou sdruženého napětí $U_S = 230$ V. Proměnnými rezistory jsme nastavili proud ve všech fázích na výstupu transformátoru na jmenovitou hodnotu $I = 1,3$ A. Tímto jsme dosáhli jmenovitého zatížení transformátoru.

Teploty jsme měřili termočláňkovou sondou digitálního teploměru TESTO 175 T3 na izolaci jednotlivých vinutích transformátoru, jelikož izolace je nejcitlivější částí z hlediska tepelné odolnosti, a ve středu magnetického obvodu v horní části. Nejprve s intervalem 15 minut do času 120 minut od začátku zkoušky, a poté s intervalem 30 minut až do dosažení hodnoty konstantního oteplení, tj. kdy nedošlo ke změně teploty o více než

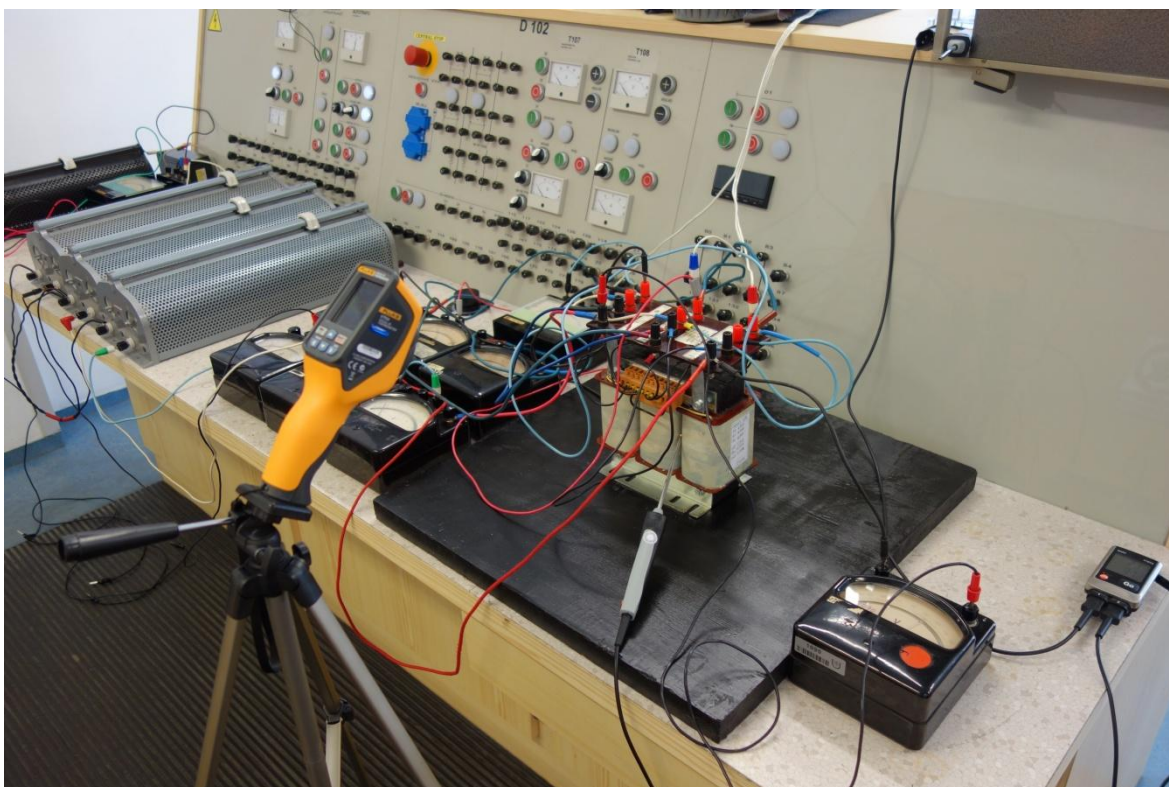
2° K za hodinu, což bylo po 360 minutách měření. Druhou sondou teploměru jsme měřili teplotu okolního prostředí a zaznamenávali se stejným intervalem.



Obr. 11: Schéma zapojení při měření s metodou přímého zatěžování

Snímání vizuálním infračerveným teploměrem

Pro kontrolu naměřených hodnot získaných z teplotní sondy jsme využili vizuální infračervený teploměr FLUKE VT04, kterým jsme se stejným časovým intervalem snímali teplotu na izolacích jednotlivých vinutí transformátoru.



Obr. 12: Oteplovací zkouška transformátoru

3.2 Naměřené a vypočítané hodnoty

Metoda změny odporu

Naměřené hodnoty napětí a proudu a dopočítaná hodnota odporu dle vztahu (3.1) jednotlivých vinutí před zahájením oteplovací zkoušky:

Tab. 1: Naměřené hodnoty měření odporu vinutí před zahájením zkoušky

	vinutí a	vinutí b	vinutí c	vinutí A	vinutí B	vinutí C
U [V]	0,343	0,342	0,346	1,052	1,05	1,02
I [A]	0,3	0,305	0,31	0,32	0,32	0,315
R [Ω]	1,143	1,121	1,116	3,288	3,281	3,238

Po dosažení konečného oteplení:

Tab. 2: Naměřené hodnoty měření odporu vinutí po dosažení konečného oteplení

	vinutí a	vinutí b	vinutí c	vinutí A	vinutí B	vinutí C
U [V]	0,357	0,378	0,371	1,027	1,036	1,022
I [A]	0,26	0,275	0,275	0,255	0,25	0,255
R [Ω]	1,373	1,375	1,349	4,027	4,144	4,008

Ze změny odporu určené hodnoty oteplení jednotlivých vinutí, dle rovnice (2.1):

Tab. 3: Hodnoty oteplení vinutí transformátoru určené metodou změny odporu

	vinutí a	vinutí b	vinutí c	vinutí A	vinutí B	vinutí C
Δt [$^{\circ}\text{C}$]	51,2	57,6	53,2	57,4	67,2	60,7

Příklady výpočtu:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,343}{0,3} = 1,143 \Omega \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{R_2 - R_1}{R_1} (234,5 + t_1) - (t_2 - t_1) = \\ &= \frac{1,373 - 1,143}{1,143} (234,5 + 23,8) - (24,5 - 23,8) = 51,2 \text{ } ^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Metoda přímého zatížení

Následující tabulka zobrazuje dotykovým teploměrem naměřené teploty (t) na izolacích jednotlivých vinutí (A, B, C), na vrcholu magnetického obvodu (MO) a teplotu okolního prostředí v čase od zahájení oteplovací zkoušky.

Tab. 4: Naměřené hodnoty teplot při měření dotykovým teploměrem

čas [min]	t vinutí A [°C]	t vinutí B [°C]	t vinutí C [°C]	t MO [°C]	t okolí [°C]
0	23,8	23,8	23,8	23,8	23,8
15	31,1	31,5	30,8	28,7	23,7
30	35,8	36,7	36	32,3	23,7
45	39,2	40,5	39,9	35,4	23,9
60	41,3	43,2	42,7	37,8	24,1
75	43,2	46,1	45,2	40,1	24,3
90	44,8	48,3	47,2	42,8	24,3
105	45,7	49,2	48,1	45,2	24
120	46,8	50,5	49,3	47,5	24,3
150	48,5	52,2	51,1	50,9	24,4
180	50,1	54	52,8	54,5	24,4
210	51,9	55,9	54,4	58	24,3
240	53,4	58,3	56,6	60,3	24,3
270	54	59,2	57,4	61,6	24,4
300	54,2	59,9	58,3	62,8	24,2
330	54,5	60,6	58,5	63,5	24,4
360	54,6	60,9	58,7	63,9	24,5

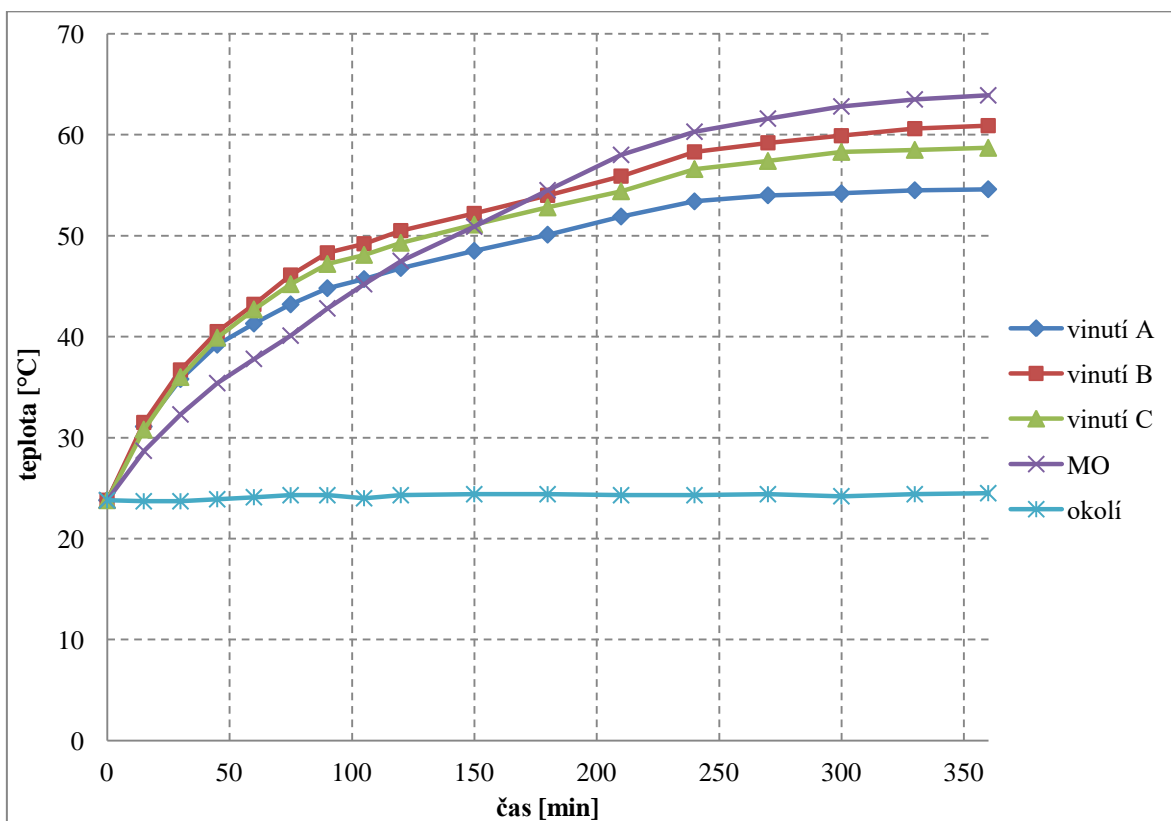
Snímání vizuálním infračerveným teploměrem

Následující tabulka zobrazuje stejným způsobem teploty snímané infračerveným teploměrem pouze na izolacích jednotlivých vinutí (A, B, C).

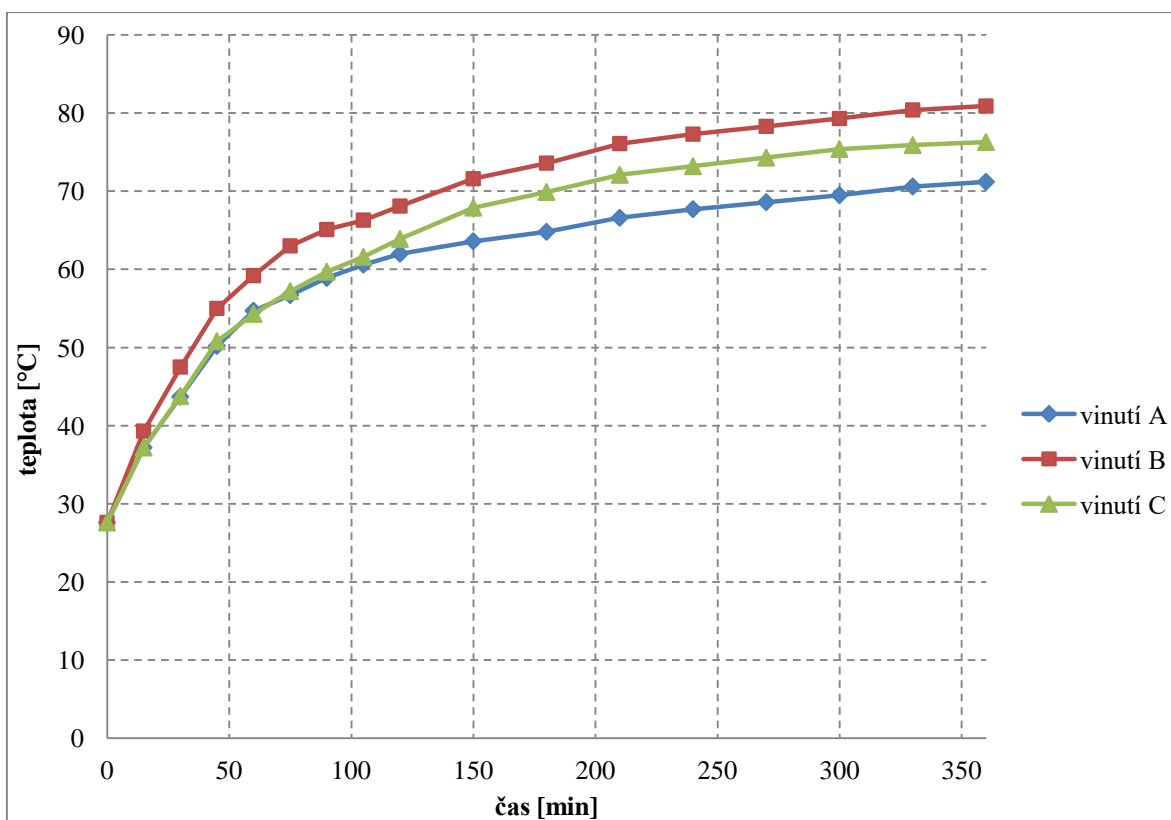
Tab. 5: Naměřené hodnoty teplot snímané infračerveným teploměrem

čas [min]	t vinutí A [°C]	t vinutí B [°C]	t vinutí C [°C]
0	27,6	27,6	27,6
15	37,2	39,3	37,2
30	43,7	47,5	43,8
45	50,2	55	50,8
60	54,7	59,2	54,3
75	56,7	63	57,2
90	58,9	65,1	59,7
105	60,6	66,3	61,6
120	62	68,1	63,9
150	63,6	71,6	67,9
180	64,8	73,6	69,9
210	66,6	76,1	72,1
240	67,7	77,3	73,2
270	68,6	78,3	74,3
300	69,5	79,3	75,4
330	70,6	80,4	75,9
360	71,2	80,9	76,3

3.3 Grafické znázornění naměřených hodnot – oteplovací křivky



Obr. 13: Oteplovací křivka transformátoru získaná měřením dotykovým teploměrem



Obr. 14: Oteplovací křivka transformátoru získaná měřením infračerveným teploměrem

3.4 Vyhodnocení naměřených hodnot

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty celkového oteplení jednotlivých vinutí transformátoru získané všemi použitými metodami.

U metody změny odporu jsou uvedena oteplení vinutí s nižší teplotou – jedná se o vnější vinutí, a tudíž jsou naměřené hodnoty více porovnatelné s měřením dotykovým teploměrem na izolaci a snímání infračerveným teploměrem.

Tab. 6: Výsledné hodnoty oteplení transformátoru

	vinutí A	vinutí B	vinutí C
Hodnota oteplení získaná dotykovým teploměrem [°C]	30,8	37,1	34,9
Hodnota oteplení získaná infračerveným teploměrem [°C]	43,6	53,3	48,7
Hodnota oteplení získaná metodou změny odporu [°C]	51,2	57,6	53,2
Hodnota oteplení magnetického obvodu [°C]	40,1		

Ve výsledcích je patrný výrazný rozdíl mezi oteplením získaným jednotlivými metodami. Jako nejpřesnější výsledky lze považovat oteplení získané metodou změny odporu, kde bylo výpočtem přesně určeno oteplení celého vinutí dané fáze.

Měření dotykovým teploměrem bylo prováděno na vnější straně každého vinutí, navíc přes izolaci, která slouží také jako izolace tepelná. Pro dosažení přesných výsledků oteplení vinutí by bylo nutné měřit teplotu v prostřední vrstvě závitů, což vzhledem ke konstrukci transformátoru nebylo technicky možné.

Dle normy ČSN EN 61558 se teplota izolace sleduje na místech, kde by její porušení mohlo způsobit kontakt mezi živými částmi, přístupnými vodivými částmi a také na místě, kde dosahuje teplota izolantu nejvyšší hodnoty, jelikož by zde mohlo dojít k riziku vzniku ohně. [19] Pro získání těchto hodnot by bylo nutné měřit teplotu na izolacích mezi sloupky, což také nebylo možné, kvůli rozměrům sondy teploměru.

Konkrétní hodnota maximální teploty, které může transformátor dosáhnout, je závislá na třídě izolace. Třídou izolace měřeného transformátoru bohužel neznáme, avšak nejnižší z v normě uvedených teplot je pro izolaci třídy A rovna 100 °C [19]. Této teploty jsme dle našich hodnot nedosáhli, ani jsme se k ní nepřiblížili, tudíž měřený transformátor odpovídá normativním požadavkům. Je však nutné vzít v potaz, že nevíme, do jakých podmínek byl transformátor původně navrhován. Pokud by byl umístěn v uzavřeném obalu, dosahovalo by oteplení jistě vyšších hodnot, než když byl měřen na podložce na volném prostranství.

Z měření dotykovým teploměrem jsme také získali teplotu oteplení magnetického

obvodu, kterou bylo možné změřit přesně, jelikož magnetický obvod transformátoru je přístupný.

Poslední metodou bylo měření infračerveným teploměrem, kde naměřené hodnoty sledují trendy patrné u měření dotykovým teploměrem, avšak jsou zde rozdíly v konkrétních hodnotách teplot. Jak je uvedeno v teoretické části práce, toto měření je náchylné na okolní vlivy, zde konkrétně neznámá hodnota emisivity izolace transformátoru, což pravděpodobně způsobilo danou odchylku.

U všech použitých metod dosahovalo největšího oteplení vinutí na prostředním sloupku (vinutí B), na krajních sloupcích byla teplota vždy nižší.

Průběhy oteplovacích křivek z obou metod odpovídají očekáváním. Na počátku zkoušky je růst teploty nestrmější a postupně se jeho rychlost snižuje. Zajímavý je vývoj teploty magnetického obvodu, kde lze pozorovat, že oteplování magnetického obvodu probíhá pomaleji než samotných vinutí, ale v zhruba polovině doby trvání zkoušky překročí hodnota teploty magnetického obvodu teplotu vinutí měřenou dotykovým teploměrem na izolaci. To potvrzuje, že vnější izolace vinutí slouží i jako izolace tepelná.

4 Závěr

Práce se snaží uvést ucelený přehled současných možností měření teploty. S ohledem na předepsaný rozsah práce je popis jednotlivých způsobů velmi stručný a některé specifičtější způsoby jsou vynechány. Na základě provedené rešerše a dispozic katedry byly pro měření teploty při oteplovací zkoušce zvoleny teploměry TESTO 175 T3 s termočláňkovými sondami a infračervený teploměr FLUKE VT04.

Oteplovací zkoušku jsme provedli v souladu s platnými normami ČSN EN 60076 a ČSN EN 61558. Průběh oteplovací zkoušky neprovázely žádné komplikace. K dosažení konečného oteplení transformátoru došlo po 360 minutách od začátku měření.

Jako nejpřesnější z použitých metod jsme vyhodnotili metodu změny odporu, která je přesně popsána v normě ČSN EN 61558. Hodnota oteplení získaná výpočtem není v případě přesného změření napětí a proudu vinutím nijak negativně ovlivněna.

Výsledky získané měřením dotykovým teploměrem jsou odlišné kvůli nemožnosti měřit teplotu v prostřední vrstvě závitů, ale pouze přes izolaci. Odchyłka u hodnot naměřených infračerveným teploměrem je způsobena nesprávně nastavenou hodnotou emisivity.

Konečná naměřená hodnota oteplení je nižší, než jsme očekávali, ale jak je uvedeno ve vyhodnocení naměřených hodnot, je možné, že transformátor byl původně určen do uzavřeného obalu, kde by poté oteplení dosahovalo vyšších hodnot.

Podle námi naměřených hodnot transformátor vyhovuje požadavkům normy a je možné ho dále v laboratoři provozovat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] SVOBODA, Emanuel a kol. *Přehled středoškolské fyziky*. 3. vyd. Olomouc: Prometheus, 2001. ISBN 978-80-7196-438-4.
- [3] KADLEC, Karel a KMÍNEK, Miloš. *Měřicí a řídicí technika* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská, 2005 [cit. 21. 4. 2016]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/>
- [4] ČSN 25 8005. *Názvosloví z oboru měření teploty*. Praha: Český normalizační institut, 1988.
- [5] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-180-2.
- [6] H-B INSTRUMENT. *H-B DURAC General purpose liquid-in-glass thermometer* [online]. [cit. 23. 5. 2016]. Dostupné z: https://www.belart.com/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/B/6/B60800-3000_46.jpg
- [7] ŠOBR, Josef a kol. *Návody pro laboratorní cvičení z fyzikální chemie*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská, 2001. ISBN 80-7080-445-9.
- [8] METRA ŠUMPERK. *Technický teploměr TR TU* [online]. [cit. 23. 5. 2016]. Dostupné z: http://www.metra-su.cz/wpimages/foto/tr_tu.jpg
- [9] AUTOMATION DIRECT. *PT100 RTD Sensors and RTD Probes* [online]. [cit. 23. 5. 2016]. Dostupné z: http://www.automationdirect.com/images/overviews/rtd_sensors_400.jpg
- [10] MILWAUKEE. *TH300 Thermistor Thermometer* [online]. [cit. 23. 5. 2016]. Dostupné z: http://www.milwaukeeinst.com/site/db/img/TH300_big.jpg
- [11] GEOCORP. *Thermocouples* [online]. [cit. 23. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.geocorpinc.com/images/billboard.png>
- [12] SOVA, Jan a KADLEC, Karel. *Termokamery a pyrometry – princip, měření, vlastnosti a využití*. [online]. 2014, [cit. 23. 5. 2016]. Dostupné z: http://www.workswell.cz/wp-content/uploads/2014_1_AFP_1.pdf
- [13] TROTEC. *Pyrometr BPI7* [online]. [cit. 23. 5. 2016]. Dostupné z: https://trotec24.blob.core.windows.net/product-assets/images/1000x1000/1635911303477825876_aa132e19-c872-4e87-82a2-280d4a151cda.jpg
- [14] FLUKE. *Fluke Infrared camera Ti450* [online]. [cit. 23. 5. 2016]. Dostupné z: <http://media.fluke.com/images/F-ti450-03a-ko-600x402.jpg>

- [15] TESTO. *Testoterm – teplotní proužky* [online]. [cit. 23. 5. 2016]. Dostupné z https://www.testo.cz/resources/3f/32/67d02dea7f94/0646-0108-messtreifen_pdpz.jpg
- [16] TESTO. *Záznamník teploty Testo 175 T3* [online]. [cit. 3. 5. 2016]. Dostupné z http://www.merici-priroje.eu/Prospekty/Prospekt_testo_175T3.pdf
- [17] FLUKE. *VT04, VT04A and VT02 Visual IR Thermometers* [online]. 2014, [cit. 3. 5. 2016]. Dostupné z http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/6000547_6136_ENG_F_W.PDF
- [18] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-2.
- [19] ČSN EN 61558-2. *Bezpečnost výkonových transformátorů, napájecích zdrojů, tlumivek a podobných výrobků. – Část 1: Všeobecné požadavky a zkoušky* 2. vydání. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [20] ČSN EN 60076-1. *Výkonové transformátory – Část 1: Obecně*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [21] ČSN EN 60076-2. *Výkonové transformátory – Část 2: Oteplení transformátorů ponořených do kapaliny*. 2. vydání. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [22] ČSN EN 60076-11. *Výkonové transformátory – Část 11: Suché transformátory*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [23] ČSN EN 60076-15. *Výkonové transformátory – Část 15: Výkonové transformátory plněné plynem*. Praha: Český normalizační institut, 2013.